

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS
MATERIAIS

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA PLACA
CERÂMICA AO LONGO DO PROCESSO DE MONOQUEIMA EM FORNO A
ROLOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DOS MATERIAIS

LAERCIO EVARISTO VIEIRA

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2002.

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA PLACA CERÂMICA AO
LONGO DO PROCESSO DE MONOQUEIMA EM FORNO A ROLOS**

LAERCIO EVARISTO VIEIRA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO MATERIAIS
PARTICULADOS.**

PROF. DR. MÁRCIO CELSO FREDEL – ORIENTADOR

PROF. DR. ALEXANDRE LAGO – COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. ORESTES ESTEVAM ALARCON – PRESIDENTE

PROF. DR. DACHAMIR HOTZA

PROF. DR. PAULO ANTÔNIO PEREIRA WENDHAUSEN

DR. ENG. SAULO GÜTHS

AGRADECIMENTOS

A minha amada companheira, Elinéia, a qual devo muito, sobretudo por sua paciência, dedicação, compreensão e carinho.

Ao meu filho, Otávio Augusto, que embora tenha vindo ao mundo em um momento delicado do desenvolvimento do tema, jamais foi motivo para desistir dele e sim gerou mais ânimo e compreensão dos fatos e da vida, contribuindo significativamente para a melhoria do meu desempenho.

Aos amigos do dia a dia, Pedro Artur, Ana Cláudia, Sérgio Murilo e Fernanda, que sempre me incentivaram, além de me proporcionarem amizades extremamente sólidas.

Ao professor Márcio Celso Fredel, pela sua dedicação e orientação no desenvolvimento e conclusão do tema.

A Empresa CEUSA, em Urussanga – SC, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor Humberto Gracher Riella, por ter realizado a ponte com a diretoria da empresa CEUSA para a realização dos testes em sua linha de produção.

Ao centro de Tecnologia em Cerâmica – CTC, em Criciúma, por ter cedido o equipamento experimental, indispensável para a execução dos testes, e também, em especial a Cristiano Coelho, que na ocasião trabalhava no CTC e hoje é funcionário da Caixa Econômica Federal, pelo auxílio na realização dos experimentos na CEUSA.

À CAPES, pelo auxílio financeiro.

Aos colegas do LabMAT, Lisiane, Eiji, Viviana, Vivian, Elídio, Armando, Etney e Alexandre, que muito contribuíram com suas amizades e trocas de conhecimentos.

Aos professores Orestes Alarcon, Paulo Pereira Wendhausen, Dachamir Hotza e Saulo Güths, pela participação como membros da banca examinadora, especialmente ao professor Dachamir Hotza, por suas colocações e correções que enriqueceram a discussão do tema.

De modo geral, a todos que de forma direta ou indireta tenham contribuído para a realização desta dissertação.

Índice

Lista de figuras	vi
Lista de tabelas.....	viii
Lista de símbolos	ix
Resumo.....	xi
Capítulo I – Introdução	1
Introdução e objetivos	1
Capítulo II – Estado da Arte.....	5
2.1 – O processo de queima	5
2.1.1 – Conceito de queima.....	6
2.1.2 – Técnicas de queima	6
2.1.3 – Sinterização	7
2.1.4 – Queima rápida.....	11
2.1.5 – Reações que ocorrem durante a queima.....	12
2.1.6 – Determinação da curva de queima	13
2.2 – Fornos cerâmicos para queima rápida	15
2.2.1 – Princípio de funcionamento e características construtivas do forno rolos monocal.....	15
2.2.2 – Principais componentes do forno a rolos.....	17
2.2.3 – Sistema de combustão.....	21
2.2.4 – Seções do forno	23
2.3 – Transferência de calor no processo de queima rápida.....	25
2.3.1 – Transferência de calor por convecção	26
2.3.2 – Transferência de calor por radiação.....	29
2.3.3 – Balanço térmico para placa cerâmica ao longo do processo de monoqueima em fornos a rolos	29
Capítulo III – Aparato e Metodologia Experimentais	32
3.1 – Aparato experimental.....	32
3.1.1 – Forno a rolos monocal.....	32
3.1.2 – Sistema registrador de temperatura	36

3.2 – Metodologia experimental.....	39
3.2.1 – Procedimento experimental.....	39
3.2.2 – Propriedades termofísicas.....	42
3.2.3 – Metodologia de cálculo	44
3.2.4 – Análise química.....	47
Capítulo IV – Resultados e Discussão	48
4.1 – Perfil de velocidade dos gases no forno.....	48
4.2 – Número de Reynolds.....	49
4.3 – Curva de queima	51
4.4 – Análise térmica	52
4.5 – Diferenças entre as temperaturas do fluido e da placa	54
4.6 – Comportamento termodinâmico da placa cerâmica.....	55
Capítulo V – Conclusões	65
Capítulo VI – Sugestões	67
Referências Bibliográficas	69
Anexos.....	71
A. Componentes do sistema registrador de temperatura.....	71
B. Propriedades termofísicas	75
C. Perfil de velocidade	76
D. Incertezas experimentais.....	77
E. Regra dos trapézios.....	80

Lista de Figuras

Figura 1	– Curva de queima – processo de monoqueima.....	2
Figura 2	– Representação e terminologia das porções de materiais.....	8
Figura 3	– Transporte de material na sinterização por fase vapor.....	9
Figura 4	– Transporte de material na sinterização durante o estado sólido.....	10
Figura 5	– Sinterização com presença de fase líquida no estágio inicial.....	11
Figura 6	– Forno a rolos em construção.....	16
Figura 7	– Forno a rolos em uma unidade fabril.....	16
Figura 8	– Transferência de calor por convecção em uma placa plana.....	26
Figura 9	– Placa cerâmica sobre os rolos e com fluxos de calor.....	30
Figura 10	– Volume de controle para a placa plana.....	31
Figura 11	– Forno a rolos de teste na indústria: a) vista das peças entrando no forno; b) vista das peças saindo do forno e c) vista lateral do forno.....	34
Figura 12	– Desenho esquemático do forno a rolos utilizado no experimento.....	35
Figura 13	– Painel de controle.....	36
Figura 14	– Sistema registrador de temperatura: a) sistema kiln tracker da datapaq e b) sistema kiln tracker em forno a rolos para placas cerâmicas.....	37
Figura 15	– Princípio de funcionamento do sistema registrador de temperatura.....	37
Figura 16	– Princípio de funcionamento do sistema registrador de temperatura no forno a rolos.....	38
Figura 17	– Posição dos termopares na placa cerâmica.....	40
Figura 18	– Seção transversal do forno a rolos em forma esquemática.....	42
Figura 19	– Perfil de velocidade dos gases no forno.....	49
Figura 20	– Número de Reynolds para o escoamento dos gases no forno.....	50
Figura 21	– Perfil de queima.....	51
Figura 22	– Incerteza de medição da temperatura da placa no forno.....	52
Figura 23	– Análise calorimétrica diferencial (DSC) e termogravimétrica (TG).....	53
Figura 24	– Perfis das temperaturas do fluido e da placa cerâmica ao longo do forno até a região de queima.....	55

Figura 25	– Perfil termodinâmico da placa cerâmica a partir da entrada do forno até a região de queima: a) tempo de aquecimento; b) temperatura de aquecimento e c) posição de aquecimento.....	57
Figura 26	– Comparação entre calores acumulados por evento durante a queima de uma placa cerâmica.....	59
Figura 27	– Distribuição da energia acumulada na placa cerâmica ao longo do processo de monoqueima em forno a rolos, onde s indica a subida do pico e d indica a descida do pico.....	61
Figura 28	– Incerteza de medição da taxa de variação da energia interna da placa cerâmica.....	64
Figura 29	– Barreira térmica.....	71
Figura 30	– Coletor de dados.....	72
Figura 31	– Colocação do coletor na barreira térmica.....	73
Figura 32	– Termopar tipo K para operação em forno a rolos.....	74
Figura 33	– Programa computacional de análise do perfil de queima.....	74
Figura 34	– Incertezas máxima e mínima de medição da temperatura da placa no forno.....	77
Figura 35	– Incertezas máxima e mínima de medição da taxa de variação da energia interna da placa cerâmica.....	79
Figura 36	– Interpretação gráfica para a regra dos trapézios.....	80

Lista de Tabelas

Tabela 1	– Mecanismos de sinterização.....	9
Tabela 2	– Tempos habituais de queima.....	12
Tabela 3	– Valores aproximados de h	28
Tabela 4	– Valores de C , m e n para a convecção forçada para uma placa plana.....	28
Tabela 5	– Localização dos termopares ao longo do forno de teste, onde x indica o(s) módulo(s) que contém controle de temperatura.....	35
Tabela 6	– Temperatura do fluido na corrente livre.....	43
Tabela 7	– Análise química da amostra da placa cerâmica de teste.....	47
Tabela 8	– Principais fenômenos que contribuem para a redução da energia interna da placa cerâmica durante a sua queima.....	57
Tabela 9	– Grandezas físicas que definem o intervalo de ocorrência dos eventos.....	62
Tabela 10	– Incerteza de medição da taxa de variação da energia interna para setores do forno industrial.....	64
Tabela 11	– Propriedades termofísicas para os gases do forno à pressão atmosférica..	75
Tabela 12	– Perfil de velocidade.....	76

Lista de Símbolos

A:	área [m^2];
c:	calor específico [J/g K];
E:	energia [J];
\dot{E} :	potência gerada e/ou absorvida [W];
F:	fator de forma;
h:	coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W/m}^2 \text{ K}$];
\bar{h} :	coeficiente de transferência de calor por convecção médio [$\text{W/m}^2 \text{ K}$];
k:	condutividade térmica [W/m K];
Nu:	número de Nusselt;
\bar{Nu} :	número de Nusselt médio;
Pr:	número de Prandtl;
Re:	número de Reynolds;
q:	fluxo de calor por unidade de área [W/m^2];
Q:	fluxo de calor [W];
t:	tempo [s];
T:	temperatura [$^{\circ}\text{C}$];
u:	velocidade [m/s];
V:	volume [m^3];
x:	posição horizontal [m];
y:	posição vertical [m];
z:	elevação [m];
Δp :	diferencial de pressão [Pa];
Δt :	diferencial de tempo [s];
ΔT :	diferencial de temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

ρ :	densidade [kg/m^3];
σ :	constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann [$\text{W/m}^2 \text{K}^4$];
μ :	viscosidade dinâmica [Pa.s];
ν :	viscosidade cinemática [m^2/s];
α :	coeficiente de difusividade térmica [m^2/s];

Subscritos

1:	superfície ou posição;
2:	superfície ou posição;
c:	crítico;
Inf:	inferior;
INT:	interna;
f:	fluido;
G:	geométrico;
L:	comprimento da placa;
o:	inicial;
P:	placa;
x:	posição na placa a partir da borda de ataque do escoamento;
∞ :	fluido;
ϵ :	emissividade.

RESUMO

A etapa de queima absorve cerca de 60% da energia térmica total consumida nas indústrias cerâmicas de revestimento. O elevado consumo de energia térmica pode ser atribuído, entre outras causas, às diversas taxas de aquecimento as quais as placas cerâmicas são submetidas durante o processo de queima. Este trabalho tem como objetivo principal estudar a influência destas diferentes taxas de aquecimento no consumo de energia térmica, baseado em uma análise dos processos de transferência de calor durante a queima de placas cerâmicas em forno a rolos. Para tal, é necessário obter-se o perfil da taxa de variação da energia interna da placa cerâmica, procurando-se identificar no processo os setores críticos e avaliar os fenômenos físico-químicos envolvidos. A análise da taxa de variação da energia interna da placa foi possível mediante uma proposta de um balanço térmico desenvolvido neste trabalho, cuja solução experimental se baseia na aplicação da primeira lei da termodinâmica à placa cerâmica ao longo do processo de monoqueima na região de aquecimento. Os experimentos relacionados com o balanço térmico foram conduzidos em laboratório e em equipamento industrial. Nestes foram medidos os perfis de temperatura de uma placa cerâmica (obtidos com um equipamento blindado que acompanhava as placas cerâmicas no interior do forno) e a pressão dos gases (através de um tubo de Pitot digital introduzido ao longo das espigas do forno). Complementarmente, em laboratório, foram realizados ensaios de análise calorimétrica diferencial e termogravimétrica para se analisar o calor de reação e as perdas de massa no processo. Como conclusão principal deste trabalho determinou-se que a eliminação da matéria orgânica e a decomposição de carbonatos contribuem significativamente na determinação do perfil da taxa de variação da energia interna de uma placa cerâmica na região de aquecimento afetando intensamente o consumo de energia térmica.

ABSTRACT

The stage of firing absorbs about 60% of the total thermal energy consumed in the ceramic covering industries. The raised consumption of thermal energy can be attributed causes among others, to the diverse rates of heating which the ceramic plates are submitted during the firing process. This work has as main objective to study the influence of these different rates of heating in the consumption of thermal energy, based in an analysis of the processes of heat transfer during the firing of ceramic plates in roller hearth kilns. For such, it is necessary to get the profile of the rate of variation of the internal energy of the ceramic plate, trying to identify in the critical process sectors and to evaluate the phenomena involved physic-chemical. The analysis of the rate of variation of the internal energy of the plate was possible by means of the proposal of a developed thermal balance in this work, whose experimental solution is based on the application of the first law of the thermodynamics to the ceramic plate among the process of single firing in the heating region. The experiments related with the thermal balance had been lead in laboratory and industrial equipment. In the latter the profiles of temperature of a ceramic plate (that were made with an shielded equipment that followed the ceramic plates in the interior of the kiln) and the speed of the gases had been measured (through an digital tube pitot introduced along one spyglasses them of the kiln). Complementarly, in laboratory tests of differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis had been carried through to analyze the heat of reaction and the losses of mass in the process. As main conclusion of this work it was determined that the elimination of the organic substance and the carbonate decomposition significantly contribute in the determination of the profile of the tax of variation of the internal energy of a ceramic plate in the heating region affecting intensely the consumption of thermal energy.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Um dos principais estágios na fabricação de placas cerâmicas de revestimento é o estágio da queima. É nele que ocorrem as transformações físico-químicas no esmalte e no corpo cerâmico. É neste estágio que o produto adquire as suas propriedades definitivas. Desta forma, a qualidade da placa cerâmica é irreversivelmente fixada nesta etapa e é, também, o último estágio do processo em que os defeitos podem ser amenizados.

Os produtos cerâmicos queimados dependem de um número substancial de processos físicos e reações químicas, cuja cinética determina finalmente o ciclo de queima. A reação mais lenta dita sempre a velocidade da operação. A otimização do processo se alcança quando um tempo mínimo de tratamento térmico não dá lugar a uma perda de qualidade do produto. Em geral é necessário realizar uma série de ensaios no laboratório para chegar-se a uma avaliação realista da interação entre fatores tais como: composição química, composição mineralógica, distribuição granulométrica dos componentes da mistura, temperatura de queima e atmosfera do forno. O ciclo de queima deve estar adaptado ao tipo de produto e as possibilidades técnicas do equipamento de queima, requerendo um mínimo de energia [Ibañes e Sandoval, 1996].

A necessidade de reduzir custos levou os pesquisadores da área cerâmica a uma revisão das técnicas convencionais com o objetivo de tornar os ciclos de queima mais rápidos. A busca de ciclos de queima mais rápidos, conduziu a um projeto de forno que reunísse características funcionais e econômicas otimizadas, resultando em uma queima rápida para as placas cerâmicas. A partir da década de 60, do século passado, as investigações se tornaram mais intensas, até chegar ao atual forno a rolos monocal (monoestrado) [Ibañes e Sandoval, 1996; Ghorra, 1993]. Nele, a queima do corpo cerâmico e do esmalte é feita simultaneamente e o processo é conhecido como monoqueima.

O processo de monoqueima realizado em forno a rolos apresenta, na sua grande maioria, uma curva de queima característica, conforme a Figura 1 [Mussolin, 1996].

Fig. 1 – Curva de queima – processo de monoqueima [Mussolin, 1996]

Observa-se pelo diagrama que o processo apresenta regiões de aquecimento e resfriamento que exigem mudanças na taxa de variação de temperatura. Estas zonas, aparentemente, exigem elevado consumo de energia térmica quando comparadas ao patamar de queima. Sabe-se que 60% da energia térmica total consumida nas indústrias cerâmicas de revestimento é absorvida na etapa da queima [Ghorra, 1993; Enrique et alli, 1998]. Este ciclo, empiricamente, tem funcionado bem nas indústrias, mas informações técnicas mais detalhadas a respeito são pouco conhecidas.

Com base no que foi apresentado, este trabalho tem como objetivo geral analisar a região de aquecimento de placas cerâmicas em fornos a rolos monocanal industriais. Para tal, será proposto um balanço térmico para a placa cerâmica que avalia a influência dos processos de transferência de calor na sua energia interna. Para sua validação, serão efetuados testes experimentais com um medidor de temperatura que acompanha a peça ao longo do forno.

Adicionalmente, como objetivos específicos, têm-se:

- 1- avaliar a influência que as reações físico-químicas exercem sobre a energia interna da placa ;
- 2- medir sobre a placa cerâmica o perfil de queima e analisar sua taxa de aquecimento;
- 3- medir o perfil da velocidade de escoamento dos gases, a fim de avaliar o tipo de escoamento no forno, servindo desta forma para a análise de transferência de calor por convecção;
- 4- fazer uma análise térmica do material utilizado na placa cerâmica, a fim de se obter informações do calor gerado no processo;
- 5- verificar qual o grau de influência que cada processo de transferência de calor exerce na energia interna da placa cerâmica ao longo do aquecimento, para que futuramente análises mais detalhadas possam ser efetuadas com o objetivo de melhorar a eficiência de trocas térmicas a fim de reduzir o consumo de energia térmica.

A seguir, apresenta-se de forma resumida, o conteúdo de cada capítulo desta dissertação.

No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a queima de placas cerâmicas, procurando-se enfatizar os seguintes tópicos: os diferentes tipos de processos de queima, a sinterização, o forno cerâmico a rolos e seus principais componentes. Finalizando apresenta-se um breve comentário sobre os principais modos de transferência de calor para a placa cerâmica com suas equações, além de se apresentar o balanço termodinâmico proposto para analisar a energia interna da placa cerâmica em forno a rolos.

No capítulo III, são descritos o aparato e a metodologia experimental.

Os resultados experimentais e discussões do experimento realizado em escala industrial são apresentados no capítulo IV.

As conclusões e sugestões gerais deste trabalho são apresentadas nos capítulos V e VI, respectivamente.

No anexo A são apresentados os componentes do sistema registrador de temperatura para forno a rolos, no anexo B são apresentadas as propriedades termofísicas dos gases do forno, no anexo C são apresentados os cálculos do perfil de velocidade dos gases sobre a placa cerâmica, no anexo D são apresentadas as incertezas experimentais de medição, enquanto que no anexo E é apresentada a técnica de integração numérica com base na regra dos trapézios.

CAPÍTULO II

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são apresentados o processo de queima, os fornos cerâmicos e a transferência de calor no processo de queima rápida.

É descrito no processo de queima o conceito de queima e as técnicas para obtê-la, além de se apresentar os mecanismos físico-químicos presentes durante a etapa de queima.

Nos fornos cerâmicos para queima rápida são abordados os seguintes tópicos: princípio de funcionamento, características construtivas, componentes, sistema de combustão e seções do forno.

A transferência de calor no processo de queima rápida apresenta uma breve discussão sobre os principais modos de transferência de calor para uma placa cerâmica com suas equações, além de se apresentar o balanço termodinâmico proposto para analisar a taxa de variação da energia interna da placa cerâmica durante a etapa de queima em forno a rolos.

2.1 – O PROCESSO DE QUEIMA

A fabricação de produtos cerâmicos pode ser dividida em quatro etapas: preparação da massa cerâmica; conformação; secagem e queima.

Do ponto de vista da dureza e resistência mecânica, as três primeiras etapas contribuem muito pouco, devido às partículas estarem individualizadas e fracamente unidas umas às outras. Na última etapa (queima), a peça é sujeita a temperaturas elevadas, que resulta em um aumento do grau de ligação das partículas, com uma conseqüente densificação, aumentando sensivelmente a resistência mecânica e a dureza.

2.1.1 – CONCEITO DE QUEIMA

A etapa de queima no processo de fabricação de placa cerâmica consiste em um tratamento térmico no qual a massa cerâmica sofre diversas alterações microestruturais como transformações alotrópicas, reações no estado sólido, formação de fase líquida, entre outras, em diversos intervalos de temperatura.

A queima dos materiais cerâmicos não implica em simplesmente em elevar as peças a uma determinada temperatura, mas principalmente em que velocidade se alcança esta temperatura, bem como o tempo de permanência nesta temperatura. Além disso, no resfriamento, a velocidade com que se diminui sua temperatura é também de fundamental importância, pois a presença de trincas no material queimado pode advir desta etapa.

A queima é um dos principais estágios na fabricação de placa cerâmica de revestimento, pois é nela que surgem as transformações físico-químicas no esmalte e no corpo cerâmico. É neste estágio que o produto adquire as suas propriedades definitivas. Desta forma, a qualidade da placa cerâmica é irreversivelmente fixada nesta etapa sendo, também, o último estágio do processo em que os defeitos provenientes de estágios precedentes podem ser amenizados.

Nesta etapa, se o fluxo de calor for uniforme, características estéticas e técnicas do produto final também serão uniformes aumentando, assim, sua qualidade. É evidente que esta qualidade só é alcançada se a transferência de calor para a peça e o seu perfil de temperatura forem uniformes ao longo de cada seção transversal do forno [Moreno et alli, 1996].

2.1.2 – TÉCNICAS DE QUEIMA

Até meados da década de 80, a tecnologia tradicional de biqueima em ciclo longo (fornos a túnel de vagonetas) era a que praticamente dominava o mercado do mundo cerâmico de revestimentos. Atualmente, a maior parte da produção se obtém por queima em ciclo rápido, embora existam diversas variantes. Assim, pode-se classificá-la em:

* biqueima tradicional: baseada na queima do suporte (corpo cerâmico) em forno a túnel de ciclo longo (36 - 44 h) e queima posterior do esmalte em forno a túnel de canais (10 - 18 h);

* biqueima lenta-rápida: queima do suporte em forno a túnel de ciclo longo (36 - 44 h) e queima posterior do esmalte em forno a rolos mono estrado (30 - 40 min);

* biqueima rápida: baseia-se na queima do suporte em forno a rolo mono estrado (ciclo rápido de 40 - 50 min) e queima posterior do esmalte também em forno a rolo mono estrado (30 - 40 min);

* monoqueima rápida: consiste na queima simultânea do suporte e o esmalte em forno a rolos mono estrado (30 - 40 min).

Na fabricação de pavimentos cerâmicos se utiliza quase que de forma exclusiva o processo de monoqueima rápida, mas no caso dos azulejos coexistem as diversas tecnologias, devido principalmente a: condições econômicas; excessivo controle sobre a qualidade da decoração do produto acabado; porosidade adequada; estabilidade dimensional e baixa expansão à umidade.

2.1.3 – SINTERIZAÇÃO

A sinterização é uma das etapas da queima e determina no produto final as fases mineralógicas presentes, o nível de porosidade, a dureza e a resistência mecânica, entre outras propriedades.

Ao longo da sinterização, o material passa por estados de aglomeração formados por porções de material que recebem nomes específicos. Para o entendimento das porções de materiais segundo seu estado de aglomeração será adotado como terminologia aquela representada pela Figura 2 [Thümmeler e Oberacker, 1993].

Figura 2 – Representação e terminologia das porções de materiais [Barbosa Jr, 1997, *apud* Thümmeler e Oberacker, 1993].

Durante a sinterização as partículas se unem de forma mais compacta, o que reduz a porosidade. A força motriz é alcançada pela diminuição da energia livre superficial total, devido ao contato e crescimento entre os grãos. Estes resultados são obtidos durante a queima pela transferência de material de uma parte da estrutura para outra. Os poros mudam a forma e o tamanho, tornando-se canais ou esferas isoladas. Eles passam a ser mais esféricos na forma e menor no tamanho com a queima contínua. As ações combinadas da forma e do tamanho dos poros causam um encolhimento do material,

conferindo ao mesmo uma densificação, resultando, assim, em um aumento da resistência mecânica.

Dois critérios são necessários para a ocorrência da sinterização:

- 1 - a presença de um mecanismo para transporte de material;
- 2 - uma fonte de energia para ativar e suprir este transporte de material.

O aumento da resistência mecânica pela redução da porosidade durante a sinterização é alcançada pela transferência de massa, devido à atuação isolada ou simultânea dos mecanismos resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Mecanismos de sinterização [Ghorra, 1993].

Tipos de Sinterização	Mecanismos de Transporte de Material	Energia Motora
Fase Vapor	Evaporação-Condensação	Diferencial na Pressão de Vapor
Estado Sólido	Difusão	Diferenciais na Energia Livre ou Potencial Químico
Fase Líquida	Fluxo Viscoso, Difusão	Capilaridade, Tensão de Superfície

Sinterização com presença de fase vapor: a energia motriz para este mecanismo é devido aos diferenciais de pressão de vapor. Durante a volatilização e condensação, há uma tendência de transferência de material ocasionada pelo efeito de curvatura e diferencial de pressão de vapor presentes em várias fases do sistema. Nesta etapa da sinterização ocorre apenas a troca de forma dos poros e alcança-se uma forte ligação entre as partículas adjacentes, assim o aumento da resistência mecânica e o decréscimo da permeabilidade ocorre devido à desobstrução dos poros. Este mecanismo de sinterização está esquematizado na Figura 3.

Fig. 3 – Transporte de material na sinterização por fase vapor [Ghorra, 1993].
Sinterização no estado sólido: envolve transporte de material por difusão. A difusão consiste no movimento de íons, átomos ou vacâncias através da estrutura cristalina ou ao

longo do contorno de grão. A força motriz é devida a uma diferença na energia livre ou potencial químico entre as superfícies e os pontos de contato das partículas adjacentes. De acordo com a Figura 4, este mecanismo de sinterização propicia ao compactado fortes ligações, retração e decréscimo dos poros [Ghorra, 1993].

Fig. 4 – Transporte de material na sinterização durante o estado sólido [Ghorra,1993].

Sinterização com presença de fase líquida: é a mais comum e mais conveniente para se alcançar um produto de alta densificação. A sinterização com presença de fase líquida envolve a presença de um líquido viscoso na temperatura de sinterização e é o principal mecanismo de densificação para a maioria dos sistemas formados por silicatos, como por exemplo, a cerâmica de revestimento, já que do ponto de vista prático ela propicia um grande aumento da velocidade de sinterização. Neste mecanismo o líquido deve ter alta capacidade de molhabilidade sobre os sólidos e capilares, buscando eliminar a porosidade e reduzir a energia interfacial do sistema, gerando altas taxas de densificação, sem a necessidade de uso de pressões externas. O líquido além de permitir um empacotamento mais eficiente, reduz também a fricção partícula-partícula, o que contribui para um melhor rearranjo das partículas no início da sinterização. Cuidados no controle da formação da fase líquida são de fundamental importância, pois a mudança da forma estrutural do compactado está relacionada com a presença de um alto percentual de fase líquida [Stainer, 1997]. A Figura 5 permite visualizar o avanço da sinterização pela presença da fase líquida, observa-se que o líquido está molhando as superfícies de contato entre as partículas no sólido, de modo a melhorar a sinterabilidade.

Fig. 5 – Sinterização com presença de fase líquida no estágio inicial [German, 1996].

2.1.4 – QUEIMA RÁPIDA

A necessidade de reduzir custos levou os pesquisadores da área cerâmica a uma revisão das técnicas convencionais (tradicionais) de queima. Processos de queima rápida

propiciam vantagens sobre a queima tradicional, tais como: economia em espaço de fábrica e menor quantidade de energia.

O termo queima rápida não é suficientemente específico, admite diferentes significados e, portanto, oferece certa confusão. Em princípio, qualquer redução no tempo do ciclo de queima, poderia ser associada ao processo de queima rápida. Assim, aparecem argumentos a favor de 3h, 1h ou menos para que o processo seja considerado uma queima rápida. Atualmente a definição mais aceita para o processo de queima rápida implica no tempo de queima inferior a 90 minutos [Ibañes e Sandoval, 1996].

Os processos de queima rápidos têm reduzido drasticamente os ciclos de queima de diversos produtos, alguns dos quais são mostrados na Tabela 2.

A queima rápida exige duas condições básicas para que o material possa ser produzido eficientemente. São elas:

- 1 - o forno deve ser capaz de incrementar o fluxo térmico ao material, mantendo as características de uniformidade;
- 2 - o material a queimar deve ser capaz de suportar o incremento do gradiente térmico.

Tabela 2 – Tempos habituais de queima [Ibañes e Sandoval, 1996].

Produto Cerâmico	Queima Tradicional	Queima Rápida
Revestimentos	35 horas	40-60 minutos
Pavimentos	35 horas	60-90 minutos
Cerâmica Sanitária	120 horas	7-10 horas
Louça	65 horas	2-8 horas

2.1.5 – REAÇÕES QUE OCORREM DURANTE A QUEIMA

Durante a queima de um corpo cerâmico, à medida que a temperatura se eleva verificam-se os seguintes fenômenos:

- pouco acima de 100°C, ocorre a eliminação de água adsorvida, que permaneceu após a secagem e/ou que o corpo absorveu do ambiente externo durante o tempo de saída do secador e entrada no forno;
- a cerca de 200°C ocorre a eliminação da água coloidal, que permanece inclusa dentro da partícula argilosa mesmo após a secagem;
- entre 350°C e 650°C ocorre a combustão de materiais orgânicos, que em maiores ou menores quantidades podem estar contidos na argila, e a dissociação de sulfatos;
- entre 450°C e 650°C ocorre a decomposição da matéria argilosa com liberação, sob a forma de vapor, da água de constituição (que é quimicamente combinada com a SiO_2);
- acima de 700°C a sílica e a alumina reagem com elementos fusíveis, reações que dão a formação de sílico-aluminatos complexos, que concedem ao corpo cerâmico características de dureza, estabilidade, resistência a vários agentes físicos e químicos e provavelmente a coloração final;
- entre 800°C a 900°C ocorre a decomposição de carbonatos (calcários e dolomita) com liberação de CO_2 ;
- acima de 1000°C sílico-aluminatos começam a amolecer e a fundir, formando uma espécie de vidro que englobando as partículas menos fusíveis concedem ao corpo cerâmico apreciável dureza, densidade e características de impermeabilidade.

Atingido um tempo de permanência a máxima temperatura (temperatura de queima), o corpo cerâmico é submetido a um processo de resfriamento sem perder as características obtidas na queima.

2.1.6 – DETERMINAÇÃO DA CURVA DE QUEIMA

Os produtos cerâmicos queimados levam implícitos um número substancial de processos físicos e reações químicas, cuja cinética determina finalmente o ciclo de queima. A reação mais lenta dita sempre a velocidade da operação. Os fatores de que dependem estas reações são:

- a) a composição química;
- b) a composição mineralógica;

- c) a distribuição granulométrica dos componentes da mistura;
- d) a temperatura de queima;
- e) a atmosfera do forno.

A obtenção de uma curva de queima ótima requer um conhecimento adequado dos fatores citados e de suas respectivas interações. A queima ótima se alcança quando um tempo mínimo de tratamento térmico não gera uma perda de qualidade do produto. Em geral é necessário realizar uma série de ensaios no laboratório para chegar a uma avaliação realista da interação entre todos os fatores para que se possa traçar o perfil de queima [Ibañes e Sandoval, 1996].

O ciclo de queima deve estar adaptado ao tipo de produto e as possibilidades técnicas do equipamento de queima, requerendo um mínimo de energia. Os critérios principais para estabelecer uma curva de queima ótima são:

- a) composição da peça;
- b) geometria e espessura da mesma;
- c) densidade;
- d) tipo de forno.

Os requisitos básicos da curva de queima para um material específico são determinados a partir do comportamento durante: o aquecimento, a permanência na temperatura máxima e o esfriamento; influenciando especialmente as variações dilatométricas da peça cerâmica durante essas etapas.

As curvas de dilatação são especialmente úteis para investigar a curva de queima, já que nos mostram as zonas nas quais as variações da dimensão são lentas ou pouco sensíveis frente a outras regiões com dilatações ou retrações muito rápidas, concentradas em estreitos intervalos de temperatura. Estas zonas serão particularmente perigosas, já que o gradiente de temperatura através da espessura de uma peça provocará modificação de dimensões tanto maiores quanto mais abrupta seja a curva de retração-dilatação. Assim, o efeito do quartzo e grandes retrações das pastas podem ocasionar, no caso de uma queima muito rápida, tensões internas que conduzem à ruptura da peça. A curva dilatométrica permite prever os intervalos em que convém aumentar os patamares de aquecimento ou resfriamento frente aqueles em que a velocidade de tratamento térmico pode ser acelerada sem inconvenientes. Deste modo, a curva dilatométrica pode

proporcionar em primeira aproximação uma curva teórica de queima. Esta curva se estabelece regulando a velocidade de queima de modo que as variações de dimensão sejam proporcionais aos tempos de queima. A curva inicialmente obtida se corrige posteriormente em função da experiência e das exigências de cada produto [Ibañes e Sandoval, 1996].

2.2 – FORNOS CERÂMICOS PARA QUEIMA RÁPIDA

A busca de ciclos de queima mais rápida propiciou aos pesquisadores da área cerâmica projetar um forno que apresentasse características funcionais e econômicas resultando em uma queima rápida de um corpo cerâmico. A partir da década de 60, as investigações começaram a se intensificar até chegar ao atual forno a rolos monoestrado (ou monocanal). A queima rápida constitui a vantagem mais evidenciada nos fornos a rolos monoestrados, razão pela qual freqüentemente são chamados de “fornos rápidos”. Além disso, um alto rendimento energético é alcançado em função de uma melhor razão carga útil x carga total e uma baixa inércia térmica. Como inconvenientes principais pode-se citar: necessidade da limpeza periódica e sistemática dos rolos; desgaste dos rolos motivado pela abrasão das peças e pela oxidação em caso do rolo ser metálico devido aos gases da combustão.

2.2.1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO FORNO A ROLOS MONOCANAL

O forno a rolos monocanal consiste em um conjunto estrutural que suporta uma unidade fabricada em módulos com material refratário, isolantes, fibras cerâmicas, perfis de aço e placas lisas ou escalonadas de aço. Caracteriza-se pelas dimensões limitadas, alto poder isolante e resistência ao choque térmico.

Neste forno o transporte da peça cerâmica é promovido por um conjunto motorizado de rolos que produzem um movimento de translação contínuo e suave. Estes rolos podem ser fabricados de várias ligas de aço ou cerâmicas, dependendo da

temperatura de trabalho. É usual encontrar diferentes tipos de rolos em um mesmo forno. A Figura 6 apresenta um forno a rolos monoestrado em construção, enquanto que a Figura 7 apresenta um forno a rolos na indústria.

Uma característica dos fornos a rolos é a técnica especial de construção à base de módulos pré-fabricados. Isto permite que um novo módulo possa ser inserido entre os já existentes e também facilita a própria montagem e transporte para o local de instalação. Entre cada módulo existe uma camada de lã de vidro que serve para compensar a dilatação do forno.

Fig. 6 – Forno a rolos em construção [Padua, 1990].

Fig. 7 – Forno a rolos em uma unidade fabril [Industrial Conventos – ICON, Criciúma – SC, Brasil, 1998].

Os rolos são movimentados por motores de velocidade variável. Tipicamente, os rolos são divididos em seções, cada qual com seu próprio motor. Estes motores são individualmente controlados e podem ser acionados em diferentes velocidades. Isto é feito para controlar o espaço entre fileiras de revestimento cerâmico, permitindo assim, compensação em virtude de qualquer encolhimento do corpo cerâmico (peça) ou qualquer aumento do diâmetro dos rolos devido a expansões térmicas diferenciadas em várias temperaturas, evitando desta forma o impacto de um com o outro do revestimento (peça). Este controle das velocidades dos rolos geralmente é feito por um sistema computadorizado ligado ao forno.

O diâmetro dos rolos é da ordem de 30,0 a 35,0 mm, sendo a distância entre centros de 50 mm. Com essas características construtivas, é possível que as peças se mantenham planas e tenham dimensões mínimas de $(10 \times 10) \text{ cm}^2$.

O comprimento de um forno a rolo monocanal pode variar de 10 a 120 m, enquanto que a altura interna poderá chegar a 1,4 - 1,5 m.

2.2.2 – PRINCIPAIS COMPONENTES DO FORNO A ROLOS

Apresenta-se, aqui, uma descrição resumida dos principais componentes de um sistema de forno a rolos. De acordo com Bristot [1996] os principais componentes do forno a rolos são:

a) foto células

O forno possui, geralmente, quatro foto-células, duas delas na entrada do forno e as outras duas, na saída. As foto-células da entrada e da saída do forno encontram-se alinhadas. Estas foto-células emitem um sinal entre elas, em linha reta, que atravessa toda a extensão do forno. Quando este sinal é interrompido por alguma obstrução, por exemplo, encavalamento de peças e quebras de chicana, soa um alarme no painel, indicando a obstrução no forno.

b) régua e pistões niveladores

A régua e pistões niveladores situam-se na entrada do forno. A régua regula o espaçamento das filas que estão entrando no forno, enquanto que o pistão regula o espaçamento lateral das peças em relação à lateral do forno.

c) chaminés

O forno geralmente possui três chaminés, duas das quais estão situadas na entrada do forno, e a outra, na saída (tiragem de ar quente). A primeira chaminé, na entrada, faz a retirada de ar mais saturado do forno proveniente, na sua maior parte, do aquecimento, possuindo uma vazão alta e com gases de temperatura mais baixa, funcionando, também, como um pré-forno, pois os gases quentes da zona de queima entram em contato com o material. A segunda chaminé da entrada tem uma vazão mais baixa e retira os gases a temperaturas mais elevadas. Esta chaminé evita que temperaturas muito elevadas cheguem até a entrada evitando assim defeitos como trincas de umidade e quebra de entrada. A chaminé, na saída, localizada após o resfriamento rápido, retira através da exaustão o ar quente que as peças naturalmente liberam, também chamado de resfriamento lento ou natural. As chaminés possuem um registro chamado de ar falso, que serve para regular a pressão no túnel. O ar falso ajuda, também, na manutenção do exaustor devendo estar sempre cinquent por cento ou mais aberto, pois estando aberto, o exaustor puxará também ar frio do ambiente, fazendo com que puxe menos ar quente do forno não aquecendo muito o rotor e aumentando assim a vida útil do mesmo.

d) zonas do forno

É um conjunto de queimadores localizado na lateral do forno desde a zona de aquecimento até o final da zona de queima. Cada rampa possui dois termopares, um abaixo e outro acima dos rolos, que fazem a leitura da temperatura e enviam para o

modulante no painel do forno, permitindo, assim, um controle efetivo do perfil de temperatura.

e) Servomotor

É um equipamento acoplado às tubulações de ar e gás de cada rampa, funcionando como um dosador da quantidade de ar e gás a ser jogada no queimador para efetuar a queima.

f) autoregulagem

O termopar faz a leitura da temperatura em uma região do forno. Esta leitura é enviada em milivolts para o modulante do painel que transforma o sinal em grau centígrado, verificando se o mesmo está igual ao desejado no “set point”. Este modulante mandará o sinal para o servomotor, onde o mesmo regulará a quantidade de ar e gás injetada no forno fazendo com que se consiga a temperatura desejada.

g) queimadores

São dispositivos que introduzem o gás combustível juntamente com o ar de combustão produzindo uma chama incandescente e com alta temperatura diretamente sobre o material a queimar. Os queimadores procuram dosar a quantidade de ar e de combustível da forma mais equilibrada possível para que se consiga o máximo de calor com o mínimo de combustível, dando a direção correta da chama.

h) chicana

Placa isolante localizada acima dos níveis dos rolos. As chicanas dividem as rampas, impedindo que uma rampa interfira na temperatura da outra. Podem ser reguladas pela parte superior do forno, levantando-a ou abaixando-a, de acordo com a necessidade.

i) mureta

Tem a mesma função da chicana e está localizada abaixo do nível dos rolos, não podendo ser regulada.

j) ventilador de ar de combustão

Situado no final da zona de queima, succiona o ar do ambiente jogando-o para as zonas de queima por intermédio de uma tubulação. Finalmente o ar chega aos queimadores através de tubos flexíveis conectados à tubulação.

k) ventilador de resfriamento rápido

Localizado logo após a zona de queima, este componente retira o ar do ambiente e injeta-o para dentro do forno através de mangueiras flexíveis. Dentro do forno, este ar é injetado por cima e por baixo das peças, por dutos perfurados chamados de flautas, que atravessam, transversalmente, o forno na zona de resfriamento rápido. Neste estágio a placa cerâmica sofre mudança brusca de sua temperatura.

l) ventilador da tiragem de ar quente

Localizado após o resfriamento rápido, retira o ar quente liberado pelas peças através da exaustão. O ar quente sai pela chaminé que é ramificada em tomadas superiores de retirada de ar quente, tendo a função de fazer o resfriamento lento das peças. Esta zona é chamada de zona resfriamento lento ou natural, ou seja, se retira apenas o calor excedente liberado naturalmente pelas peças. Isto se faz necessário, pois nesta zona ocorrem as transformações alotrópicas do quartzo gerando uma maior quantidade de quebra.

m) ventiladores para resfriamento

Estes estão localizados após a tiragem de ar quente, sendo normalmente um conjunto de ventiladores superiores e inferiores. Esta zona é chamada de zona de resfriamento final.

n) resfriamento com água

Localizado após os ventiladores no final do forno, este conjunto serve para o resfriamento das peças de tal modo a possibilitar o manuseio do material após a saída do forno.

o) bico de pato

É feito de material metálico, localizado em toda a extensão lateral do forno. É no bico de pato onde vai encaixado o rolo e que dá a movimentação ao mesmo, através de engrenagens acopladas ao próprio bico de pato.

p) passa rolo

São tijolos refratários que são colocados na lateral do forno, que vão desde a entrada do forno até no final da zona de tiragem de ar quente. Sua função é evitar a perda térmica contribuindo para a eficiência do forno. No passa rolo existem somente orifícios para a passagem dos rolos, e entre eles tem-se uma camada de lã de vidro para compensar a dilatação do mesmo.

2.2.3 – SISTEMA DE COMBUSTÃO

Baseado em Pádua [1990] e Ghorra [1993] é descrito o sistema de combustão.

Pode-se definir combustão como uma combinação completa, relativamente rápida e acompanhada da emissão de luz e calor, do oxigênio do ar com os elementos (geralmente

carbono e hidrogênio) contidos em determinadas substâncias de combustíveis. Esta combinação é sempre uma reação exotérmica (libera calor).

Uma reação de combustão é uma reação de óxido-redução, sendo o combustível o redutor e o oxigênio o oxidante. A oxidação do redutor ou combustível se dá à custa do oxidante ou oxigênio. A substância à custa da qual se dá a combustão, que normalmente é o oxigênio, denomina-se comburente, a fonte de oxigênio é naturalmente o ar atmosférico, cuja composição percentual em moles é a seguinte: nitrogênio = 78,03%, oxigênio = 20,99% e 0,98% de outros componentes em menor escala, tais como dióxido de carbono, hidrogênio, argônio, etc. Em cálculos de combustão considera-se a composição volumétrica ou molar do ar atmosférico seco como: oxigênio = 21%, nitrogênio = 79%.

Os primeiros fornos eram aquecidos pela combustão de lenha, porém requiritava muita mão-de-obra. O carvão foi muito usado nas indústrias cerâmicas de louça doméstica, porém seu uso está agora limitado a fornos para refratários e cerâmica estrutural. É desejável um carvão de chama longa com baixo teor em enxofre. Óleo combustível é usado em muitos fornos, especialmente em fornos túneis, onde a eficiência térmica elevada compensa o alto custo do combustível. É também usado em muitos fornos para fusão de vidro. Gás natural (GLP) é muito usado na indústria cerâmica de revestimento como combustível porque produz um calor limpo e de fácil controle.

Os elementos químicos componentes dos combustíveis ao reagirem com o oxigênio produzem substâncias gasosas como CO_2 , SO_2 , CO que se despreendem juntamente com o N_2 e O_2 do ar com H_2O em forma de vapor. Estas substâncias compreendem os gases residuais da combustão ou fumos.

A fumaça normalmente visualizada em chaminés ou condutos de escape, além dos gases residuais e do vapor d'água apresenta ainda neblinas constituídas por partículas de líquidos em suspensão (água ou hidrocarbonetos pesados condensados pelo resfriamento dos gases) e poeiras constituídas por partículas sólidas em suspensão.

A maioria dos fornos a rolos monocalha usa combustíveis de chama limpa tal como gás natural ou GLP. Os queimadores estão localizados nas paredes laterais do forno, acima e abaixo dos rolos. Estes operam de acordo com o princípio de chama-aberta, onde a combustão se processa diretamente sobre uma câmara de combustão.

Os queimadores, todos com velocidades de chama elevada, são divididos em baterias de 4, 6 ou 8 queimadores individuais. Cada bateria é alimentada por um duto de gás individual e é independente do resto. Cada bateria de queimadores é controlada, individualmente, pelo mesmo sistema que opera o movimento dos rolos, computacionalmente.

2.2.4 – SEÇÕES DO FORNO

O esquema geral de um forno está dividido em diversas regiões distintas que são física e funcionalmente diferentes [Ghorra, 1993].

O primeiro segmento do forno a rolos monocal é o pré-forno ou zona de entrada. O material isolante utilizado nesta área em que opera entre 200°C e 400°C é a fibra cerâmica para baixa temperatura. Este segmento não contém queimadores e é aquecido por gases da combustão que são puxados por um exaustor ou ventilador. A temperatura nesta área é controlada pelo volume de ar succionado pelo exaustor. A função do pré-forno é secar por inteiro o corpo cerâmico na entrada do forno, que pode conter alguma umidade residual oriunda da secagem, esmaltação, e outros processos que possam inserir umidade. Isto é feito para evitar quebras ou explosões devido à evaporação muito violenta da água em altas temperaturas que pode ser alcançada no começo da zona de pré-aquecimento.

Na zona de pré-aquecimento tanto fibras cerâmicas como material refratário são usados como isolantes. A máxima temperatura que se pode alcançar neste segmento é de 900°C. Queimadores são instalados somente abaixo dos rolos nesta parte do forno. Alguns fabricantes de fornos, fornecem uma sopragem de ar à temperatura ambiente acima dos rolos nesta região, para manter a superfície esmaltada em temperaturas mais baixas, retardando assim sua fusão. A função da zona de pré-aquecimento é extrair todos os gases ainda presentes no corpo cerâmico para a fusão posterior do esmalte. Através de um ajustamento próprio neste segmento, problemas devido à desgaseificação incompleta (tais como: coração negro; fendas, etc) podem ser resolvidos e ou evitados.

A zona de queima de alta temperatura é aquela que possui o melhor isolamento ao longo de todo o forno. Este isolamento é composto de diversas camadas de tijolos

refratários e fibras cerâmicas. Esta área se estende de 900°C até a temperatura máxima de queima, que depende de cada produto a ser queimado. Baterias de queimadores estão instalados nesta região, tanto acima como abaixo dos rolos, que permitem um severo controle sobre o perfil de temperatura da queima do produto cerâmico. A função desta zona é desenvolver a camada de esmalte e produzir o corpo cerâmico com suas propriedades finais desejadas. A maior parte da densificação e o encolhimento, sempre presente, se desenvolve com maior intensidade nesta área. O ajuste e a regulação próprios desta parte do forno ajudam a evitar empenamentos e disparidades do produto final, causados por um gradiente de temperatura através de todo o comprimento do forno.

O resfriamento do produto na queima rápida é um processo muito crítico. O controle preciso e delicado sobre esta fase é necessário para evitar quaisquer problemas ocasionados por uma taxa de resfriamento muito rápido. Assim, o comprimento total desta região pode alcançar até 45% do comprimento de todo o forno. Esta zona do forno está dividida em três partes distintas que são: zona de resfriamento rápido ou direto; zona de resfriamento lento ou indireto e zona de resfriamento final.

Na zona de resfriamento rápido, a temperatura da zona de queima (câmara de combustão) é rapidamente baixada da temperatura máxima de queima para 600°C. É uma região muito curta do forno, que usualmente não ultrapassa 4 m. O isolamento desta área é feito com o mesmo material da zona de queima. A peça cerâmica é resfriada por insufladores que estão posicionados acima e abaixo dos rolos, os quais succionam ar do meio ambiente e o injetam diretamente sob o revestimento cerâmico. Esta área é regulada e controlada pela quantidade de ar frio injetada sob a placa cerâmica e o ângulo com que este ar é direcionado. Este controle possibilita obter uma curva de temperatura de queima adequada, evita o empenamento e melhora o nível de aparência do produto final.

A zona de resfriamento lento ou indireto se estende entre 600°C a 400°C, após a região de resfriamento rápido. Esta área é maior que a anterior. Esta parte do forno é revestida com isolantes do tipo refratário e fibra cerâmica para baixa temperatura. A espessura das camadas de isolamento é reduzida quando comparada com as partes anteriores do forno. O resfriamento é realizado por dutos completamente selados que aspiram o ar do meio ambiente e o injetam acima e abaixo dos rolos, diretamente sobre a peça cerâmica. O mesmo ar ao ser aquecido a aproximadamente 350°C é coletado e, em

seguida, segue em um duto interno que é direcionado para o lado de fora do forno. Este ar é filtrado e pode ser usado para as seguintes situações: aquecimento da fábrica nos meses de inverno; servir como ar de combustão para os queimadores reduzindo assim, o consumo de energia; serve ainda para ser usado na zona do pré-forno auxiliando a secagem do produto cerâmico. É uma das zonas mais críticas do forno e nela tem lugar à transformação do quartzo, que deve ocorrer a uma velocidade suficientemente lenta para que não sejam produzidas tensões na peça que poderão vir a proporcionar trincas.

A zona de resfriamento final corresponde à parte final do forno. Geralmente uma camada de fibra cerâmica leve como isolante é usada neste trecho. O resfriamento é executado por uma variedade de pequenos ventiladores, que podem ser instalados acima e/ou abaixo dos rolos, dependendo do tipo de fabricante de forno. Um sistema de exaustão bem feito evita que o ar introduzido nesta região penetre na seção anterior do forno, prejudicando a eficiência do sistema. A função deste segmento é resfriar rapidamente a peça cerâmica e reduzir sua temperatura a um valor baixo que permita o seu manuseio, no caso do resfriamento ser exclusivamente por ventiladores ou resfriar a placa cerâmica através de ventiladores, seguido de um resfriamento com água dependendo do fabricante do forno.

2.3 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PROCESSO DE QUEIMA RÁPIDA

A queima rápida não é somente um problema de queima de uma certa quantidade de combustível num espaço e tempo limitado. Queima rápida é também um problema de transferência de calor da chama e gases quentes para o produto cerâmico.

No processo de queima rápida em fornos a rolos monocal canal existe, basicamente, os seguintes modos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação, além de, efeitos combinados na transferência de calor pelos processos anteriores podem ocorrer.

No presente trabalho será estudada a troca de calor entre a placa cerâmica, gases e queimadores propondo para tal um balanço termodinâmico que busca explicar como a placa cerâmica troca calor e muda sua energia interna. Sendo assim, o calor chega até a placa cerâmica através dos seguintes modos de transferência de calor: convecção e radiação. A convecção se processa através do fluxo forçado de gases no interior do forno

enquanto que a radiação é proveniente da chama incandescente provocada pela combustão dos gases nos queimadores.

2.3.1 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

O calor perdido ou ganho pela placa cerâmica por convecção representada pela Figura 8, é normalmente calculado usando a definição seguinte:

$$Q = h A (T_p - T_\infty) \quad (1)$$

Fig. 8 – Transferência de calor por convecção em uma placa plana [Holman,1993].

Observa-se que junto à superfície da placa (parede), a velocidade do fluido é nula e a transferência de calor para o fluido ocorre por condução, dada pela lei de Fourier

$$q = \frac{Q}{A} = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\text{PLACA}} \quad (2)$$

Isolando-se h na Equação (1) e substituindo-se o valor de q fornecido pela Equação (2) obtém-se

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_p}{(T_p - T_\infty)} \quad (3)$$

Dividindo-se tanto o numerador como o denominador por uma dimensão característica (como por exemplo, o comprimento de uma placa plana unidimensional), resulta:

$$\frac{h^* \text{ dimensão característica}}{k_f} = \frac{-\frac{\partial T}{\partial y}}{\frac{(T_p - T_\infty)}{\text{dim. carac.}}} \quad (4)$$

sendo o numerador do lado direito da equação anterior o gradiente de temperatura na direção normal a placa, enquanto o denominador é uma característica definida. O lado esquerdo é definido como o número de Nusselt.

Na Tabela 3, estão indicados os valores aproximados de coeficientes de transferência de calor por convecção.

De acordo com Bejan [1984], o número de Nusselt sobre uma placa plana isotérmica é calculado da seguinte forma:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h} L}{k_f} = C Re^m Pr^n \quad (5)$$

onde, C, m e n são constantes que dependem do tipo de escoamento que se desenvolve ao longo da placa. A Tabela 4 resume os valores que estas constantes assumem para cada situação específica.

Onde,

$$Re_x = \frac{\tilde{u}_\infty x}{\dot{\nu}} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\dot{\nu}}{\dot{\alpha}} \quad (7)$$

Tabela 3 – Valores aproximados de h [Holman,1993].

MODO	SITUAÇÃO	h [W/m².°C]
Convecção natural, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$	Placa vertical em ar, 0,3 m de altura	4,5
	Cilindro horizontal em ar, 5 cm de diâmetro	6,5
	Cilindro horizontal em água, 2 cm de diâmetro	890
Convecção forçada	Ar a 2 m/s sobre uma placa quadrada de 0,2 m de lado	12
	Ar a 35 m/s sobre uma placa quadrada de 0,75 m de lado	75
	Ar a 2 atm escoando num tubo de 2,5 cm de diâmetro a 10 m/s	65
	Escoamento cruzado de ar a 50 m/s sobre um cilindro de 5 cm de diâmetro	180
Água em ebulição	Em vaso aberto	2500 - 35000
	Escoando no interior de um tubo	5000 - 100000
Condensação do vapor de água, 1 atm	Superfícies verticais	4000 - 11300
	Sobre tubos horizontais	9500 - 25000

Tabela 4 – Valores de C , m e n para convecção forçada para uma placa plana [Bejan, 1984].

Tipo de escoamento	C	m	n
Laminar ($Pr > 0,6$ e $Re_x < 5 \cdot 10^5$)	0,664	1/2	1/3
Turbulento ($Pr > 0,6$ e $Re_x > 5 \cdot 10^5$)	0,037	4/5	1/3

2.3.2 – TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

Considerações termodinâmicas mostram que um radiador ideal, ou corpo negro, emite energia em uma taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo.

A troca líquida de calor por radiação entre duas superfícies negras, a temperaturas T_1 e T_2 é calculada através da equação de Stefan – Boltzmann, abaixo:

$$Q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

onde σ é a constante de proporcionalidade chamada de Stefan-Boltzmann que vale $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$.

Para levar em consideração o comportamento não ideal das superfícies é introduzido um outro fator, a emissividade, que relaciona a radiação de uma superfície não negra com uma superfície negra. Além disso, deve-se levar em consideração que nem toda a radiação que deixa uma superfície atinge a outra superfície, uma vez que a radiação eletromagnética se propaga segundo linhas retas havendo perdas para o ambiente. Portanto, para considerar estas duas situações, são introduzidos dois novos fatores na equação anterior,

$$Q = F_\epsilon F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

(9)

onde F_ϵ é a função emissividade e F_G é a função fator de forma geométrico.

2.3.3 – BALANÇO TÉRMICO PARA PLACA CERÂMICA AO LONGO DO PROCESSO DE MONOQUEIMA EM FORNO A ROLOS

As placas cerâmicas quando atravessam um forno a rolos monocanal são submetidas a transformações físico-químicas em virtude de um fluxo de calor controlado, oriundo de queimadores de gás posicionados nas paredes laterais do forno, colocados alternadamente acima e abaixo do plano de rolos.

Ao longo do forno as placas cerâmicas posicionadas em fileiras horizontais estão sujeitas a gradientes térmicos associados à velocidade de avanço, que permitirão transformações na estrutura interna do material. O avanço é obtido pelo movimento e rotação dos rolos, instalados transversalmente ao longo do forno e que constituem uma soleira móvel e transportadora.

Ao longo do processo de queima, cada placa cerâmica estará sujeita a fluxos de calor e sustentação mecânica conforme mostrado na Figura 9.

O balanço térmico consiste em aplicar a primeira lei da termodinâmica, localmente, a cada placa cerâmica, à medida que ela avança no forno a rolos durante o processo de queima.

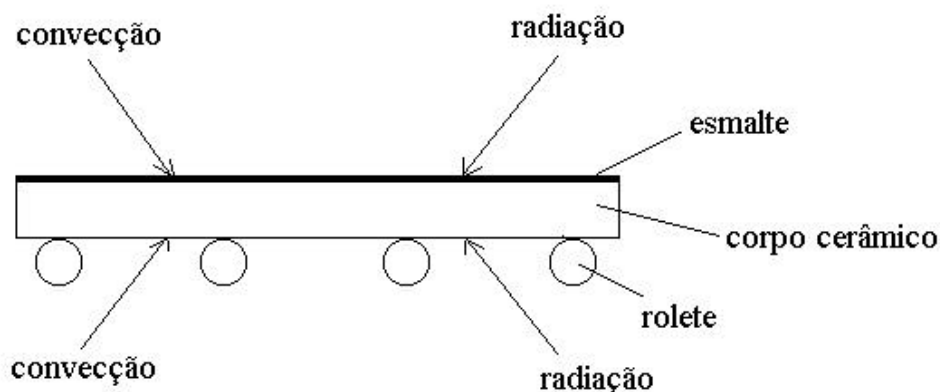


Fig. 9 – Placa cerâmica sobre os rolos e com fluxos de calor.

As transferências de calor por radiação e convecção nas extremidades serão desprezadas, haja vista que a espessura da placa é bem menor que seu comprimento, de tal forma que se possa considerar que o calor absorvido ou liberado ocorra, apenas, através das superfícies superior e inferior. Além disso, o calor perdido ou absorvido por condução pelos roletes, também possa ser desprezado, já que o contato é pontual entre rolete e placa, de tal forma que se possa considerar um ponto com fluxo de calor igual a zero (isolado).

Assim, o balanço de energia quando aplicado ao modelo da Figura 10, resulta em:

$$\frac{dE_{INT}}{dt} = \dot{E}_{ENTRA} + \dot{E}_{GERADA} - \dot{E}_{SAI} \quad (10)$$

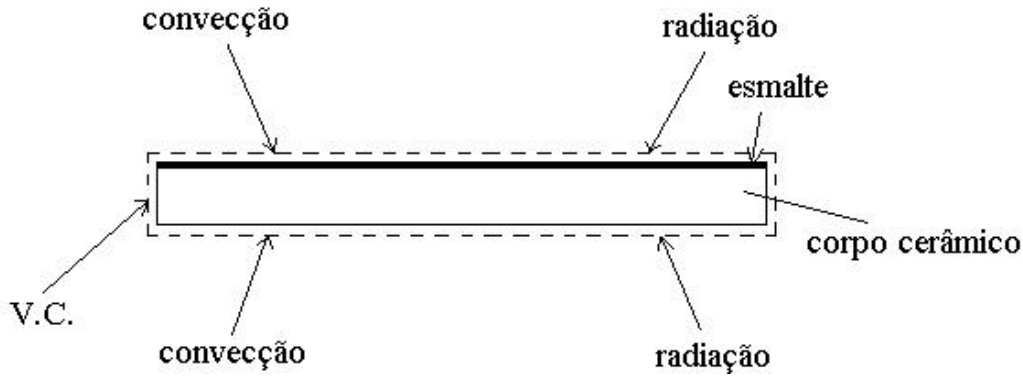


Fig. 10 – Volume de controle para a placa plana.

Sabendo que,

$$\dot{E}_{ENTRA} - \dot{E}_{SAI} = \dot{E}_{CONVECÇÃO} + \dot{E}_{RADIAÇÃO} = \dot{E}_C + \dot{E}_R \quad (11)$$

$$\dot{E}_{GERADA} = \dot{E}_{REAÇÕES\ EXOTÉRMICAS} = \dot{E}_{RE} \quad (12)$$

$$\frac{dE_{INT}}{dt} = [(\tilde{n}Vc)_{ESMALTE} + (\tilde{n}Vc)_{CORPO}] \frac{dT}{dt} \quad (13)$$

a Equação 11 resulta em,

$$[(\tilde{n}Vc)_{ESMALTE} + (\tilde{n}Vc)_{CORPO}] \frac{dT}{dt} = \dot{E}_C + \dot{E}_R + \dot{E}_{RE} \quad (14)$$

Considerando ainda que, a convecção se realiza sob uma placa plana temos:

$$[(\tilde{n}Vc)_{ESMALTE} + (\tilde{n}Vc)_{CORPO}] \frac{dT}{dt} = 2\bar{h}A(T - T_{\infty}) + \dot{E}_R + \dot{E}_{RE} \quad (15)$$

Uma outra aproximação é que $(\rho Vc)_{CORPO} \gg (\rho Vc)_{ESMALTE}$, uma vez que $V_{CORPO} \gg V_{ESMALTE}$ e que $(\rho c)_{CORPO} > (\rho c)_{ESMALTE}$, resultando assim na seguinte equação:

$$[(\tilde{n}Vc)_{CORPO}] \frac{dT}{dt} = 2\bar{h}A(T - T_{\infty}) + \dot{E}_R + \dot{E}_{RE} \quad (16)$$

A Equação 16 representa a taxa da variação da energia interna da placa cerâmica proporcionada pelas parcelas de energias de convecção, radiação e calor gerado ao longo do processo de monoqueima em forno a rolos até a região de queima.

CAPÍTULO III

APARATO E METODOLOGIA EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos o aparato experimental, características da placa de teste, o procedimento experimental e a metodologia de cálculo.

É descrito no aparato experimental tanto o forno de testes como a instrumentação necessária para a medida do perfil de temperatura.

No procedimento experimental são abordados os seguintes temas: medidas do perfil térmico, análise térmica e obtenção do perfil de velocidade.

A metodologia de cálculo adotada pretende enfocar a transferência de calor desde a região do pré-forno até a região de queima. Para tal, utiliza a equação do balanço térmico cuja descrição foi apresentada no capítulo anterior, a fim de analisar as trocas de calor entre a placa cerâmica e as várias regiões do forno a rolos.

Os testes foram realizados no forno a rolos da Cerâmica CEUSA, localizada em Urussanga - SC, enquanto que os ensaios de análise calorimétricas dinâmicas e termogravimétricas foram efetuados no LABMAT / UFSC.

3.1 – APARATO EXPERIMENTAL

3.1.1 – FORNO A ROLOS MONOCANAL

O forno utilizado para medir os perfis de temperatura e velocidade da placa cerâmica pode ser visualizado na Figura 11. Este foi fabricado na Itália (ano 1987) pela Empresa Welco, modelo 604 e possui capacidade de queimar, simultaneamente três fileiras de placas cerâmicas de dimensões 45 x 45 cm. No queimador os dois fluidos são misturados em uma dosagem pré-estabelecida para que, posteriormente, possam sofrer

combustão produzindo uma chama limpa e incandescente que servirá como fonte de calor para aquecer a peça ao longo do forno.

O forno possui acoplado um secador que tem como objetivo reduzir a umidade da placa cerâmica antes da mesma adentrar no forno. A redução da umidade evita que a peça sofra explosões durante seu aquecimento na etapa de queima.

Os dutos aparentando cor cinza clara servem para o escoamento dos gases de uma região para outra dentro do forno, além de conduzi-los para a exaustão.

A velocidade de translação de cada placa foi de 1 m/min, enquanto que o ciclo de queima teve duração de 80 min.

Na Figura 12 é apresentado um desenho esquemático do forno a rolos utilizado para os testes. As setas indicam o sentido de escoamento dos gases. As medidas indicadas estão em metros.

Os gases do forno sofrem sucção ininterruptamente através de exaustores posicionados nas regiões de entrada e de saída do forno. Uma parcela destes gases é desviada para o pré-forno e secador, enquanto que a outra parcela sofre exaustão para a atmosfera. Do pré-forno, os gases são conduzidos, novamente, para o secador e deste são exauridos para a atmosfera. Na saída do forno, parte dos gases exauridos são enviados para o secador enquanto que a outra parcela segue para a atmosfera.

O forno possui 34 módulos, os módulos intermediários (5 a 25) possuem seção transversal interna de 1,54 x 0,8 m enquanto os demais (1 a 4 e 26 a 34) apresentam seção transversal interna de 1,6 x 0,55 m. Convém salientar que entre os módulos do forno existe uma camada de isolamento de tamanho médio de 0,23 m, a qual foi omitida no desenho, o que faz com que o comprimento final do forno aumente para 80 m.

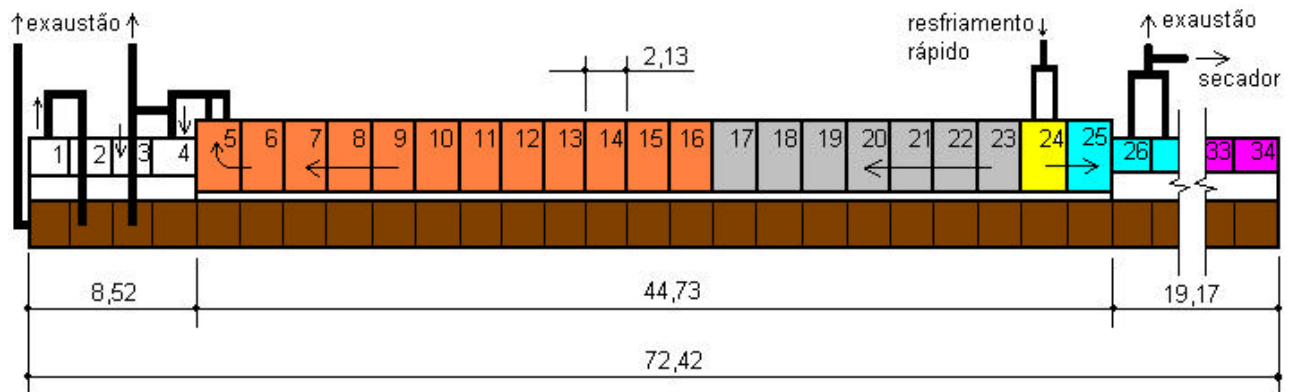
A temperatura de queima é controlada por termopares tipo K, colocados acima (T_{sup}) e abaixo (T_{inf}) do plano dos rolos a uma distância de 15 cm da placa cerâmica. A Tabela 5 indica o módulo ou conjunto de módulos que contém termopares (eles são posicionados no meio de cada módulo ou conjunto de módulos).

- a -

- b -

- c -

Fig. 11 – Forno a rolos de teste na indústria: a) vista das peças entrando no forno; b) vista das peças saindo do forno e c) vista lateral do forno.



Legenda:

- Pré-forno, região de pré-aquecimento
- Região de aquecimento
- Região de queima
- Região de resfriamento rápido
- Região de resfriamento lento
- Região de resfriamento final
- Secador

Fig. 12 – Desenho esquemático do forno a rolos utilizado no experimento.

Tabela 5 – Localização dos termopares ao longo do forno de teste, onde x indica o(s) módulo(s) que contém controle de temperatura.

Módulos	1	3	5	6	7	8	9/10	11/12	13/14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Superior	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Inferior					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Os termopares enviam sinais ao painel de controle do forno, como aquele mostrado na Figura 13. Neste as temperaturas podem ser visualizadas e comparadas com o valor desejado do “set point”; se o valor estiver diferente daquele pré-estabelecido, um sinal é enviado para o servomotor que dosa a quantidade de ar e gás a ser injetada no queimador, possibilitando o controle da temperatura. O painel de controle regula a temperatura de queima simultaneamente para dois fornos; o quadro da esquerda serve de controle para o forno 3 (F-3), enquanto o quadro da direita serve de controle para o forno 4 (F-4). Especificamente, os testes foram realizados no forno 3.

Fig. 13 – Painel de controle.

3.1.2 – SISTEMA REGISTRADOR DE TEMPERATURA

Um sistema registrador de temperatura para o forno a rolos fabricado pela DATAPAQ (Kiln Tracker System) e disponibilizado pelo Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC) - Criciúma - SC, o qual forneceu suporte técnico para a realização do trabalho, e sua colocação no forno, é mostrado na Figura 14. Ele permite monitorar o perfil de temperatura de placas cerâmicas durante a queima em forno a rolos, possibilitando assim, avaliar as regiões do processo.

Este sistema possui um software, desenvolvido pela DATAPAQ, que permite realizar uma análise do ciclo de queima através de gráficos. O registro do perfil de temperatura pelo sistema ao longo do forno (Figura 15), começa por armazenar os dados de entrada no registrador de dados (TPAQ 100) que está acoplado a uma caixa termicamente blindada (TB 3020). Em seguida, esta caixa é levada até o forno e é colocada sobre seus rolos, acompanhando as peças ao longo do mesmo. A leitura das temperaturas é feita por termopares conectados entre as peças e a caixa. Ao final do processo, o registrador é sacado, e os dados são analisados em um computador, por Intermediário de um software específico [Datapaq, 1988].

- a -

- b -

Fig. 14 – Sistema registrador de temperatura: a) sistema kiln tracker da datapaq para fornos a rolos e b) sistema kiln tracker em forno a rolos para placas cerâmicas [Datapaq, 1998].

Fig. 15 – Princípio de funcionamento do sistema registrador de temperatura [Datapaq, 1998].

Principais características do sistema:

- intervalo de medição de temperatura completamente programável, até 30 leituras por minuto para processos de queima rápida;
- precisão (+/- 1°C);
- resolução (0,1°C);
- permite instalar até 8 termopares;
- caixa termicamente blindada de alta resistência térmica para uso em fornos a rolos, cujas dimensões são: (80 x 385 x 503) mm;
- registrador de dados TPAQ 100 possui bateria individual de lítio de 7,5V, com vida útil de 20 ciclos de uma hora de duração;
- termopares são do tipo K, concebidos para uso repetido até 1200°C.

Fig. 16 – Princípio de funcionamento do sistema registrador de temperatura no forno a rolos [Datapaq, 1998].

O sistema registrador de temperatura no processo de queima em forno a rolos pode ser visto na Figura 16. O coletor está completamente isolado do meio exterior e se mantém a uma temperatura de 100°C, através do resfriamento por meio de uma camisa d'água. O conjunto é sustentado por uma placa cerâmica, específica para o teste, que garante o perfeito deslizamento sobre os rolos. Jaquetas de aço inoxidável instaladas na frente e no fundo, contendo água, fornecem proteção térmica para o coletor à medida que ele adentra no forno, garantindo assim que sua temperatura não ultrapasse 100°C. O Isolamento com fibra cerâmica evita que a água se evapore rapidamente garantido assim, que o sistema ao sair do forno contenha uma certa quantidade de água residual.

No anexo A são apresentados os componentes deste sistema.

3.2 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.2.1 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados de acordo com a seguinte seqüência :

1º - Medição do perfil de temperatura da placa ao longo da queima:

Foram realizados três testes com placas cerâmicas no processo de monoqueima em forno a rolos da Cerâmica CEUSA. As medições de temperatura foram feitas localmente na placa.

A placa de teste pode ser vista na Figura 17. Ela possui dois furos simétricos, neles foram inseridas as sondas dos termopares. Para este tamanho de placa o forno tem capacidade de queimar simultaneamente três fileiras de peças por ciclo. Cada ciclo durou 80 minutos.

Como foram realizados três testes e cada placa continha duas sondas por ciclo, resultaram assim dezoito medições de temperaturas. Aplicando uma média a estes valores, determina-se o perfil de temperatura médio para cada placa cerâmica ao longo do forno. Este perfil é conhecido tecnicamente como curva de queima. A aquisição de dados se deu com intervalos de 3 s para cada sonda ao longo de cada ciclo.

Fig. 17 – Posição dos termopares na placa cerâmica.

2° - Análise térmica:

A análise térmica procurou identificar os picos exotérmicos e endotérmicos das reações que se desencadearam na placa cerâmica durante a queima. Esta etapa tem como objetivo identificar o calor gerado (reação exotérmica) e calor absorvido (reação endotérmica) dentre as diversas regiões compreendidas entre pré-forno e queima no forno a rolos. Neste tipo de ensaio, conhecido como DSC (Differential Scanning Calorimetry) e TGA (Thermogravimetric Analysis), buscam-se analisar as respostas energéticas e perda de massa da amostra da placa cerâmica frente a taxas de aquecimento em tempo real.

Neste tipo de ensaio comparam-se as mudanças sofridas pela amostra com o comportamento energético de um material inerte, como por exemplo, o coríndon, Al_2O_3 . Devido à liberação e/ou absorção de calor da amostra em função das reações citadas anteriormente, determina-se uma diferença de temperatura ΔT entre o material inerte e a amostra. Essa diferença pode ser positiva ou negativa caso a reação seja exotérmica ou endotérmica, respectivamente.

As análises térmica DSC e ATG foram realizadas em um equipamento Netzsch STA 409 EP. O ensaio foi realizado no LABMAT – UFSC. A taxa de aquecimento empregada foi de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

3° - Determinação do perfil de velocidade:

Esta etapa visa determinar o perfil da velocidade dos gases ao longo do processo de queima. Ela foi estimada com o auxílio do tubo de Pitot, que mede o diferencial de pressão entre a pressão de estagnação e a pressão estática em coordenadas específicas ao longo do comprimento do forno. Na pressão de estagnação a velocidade do fluido é reduzida a zero enquanto que a pressão estática seria aquela medida se o tubo pudesse acompanhar o escoamento. Aplicando a equação de Bernoulli ao longo de uma linha de corrente do escoamento e levando em consideração que o escoamento é incompressível e livre de fricção, localmente, o perfil de velocidade será determinado em função do diferencial de pressão ao longo da extensão do forno até região de queima. As medidas

foram efetuadas nas bocas (espias) laterais do forno, posicionadas abaixo do nível dos rolos.

O manômetro utilizado no experimento foi do tipo digital, fabricado pela Dwyer Instruments da série 477-1.

As medições foram realizadas em várias posições pré-estabelecidas, abaixo do plano de rolos. As medidas foram executadas em dois pontos para cada posição distribuídos simetricamente em relação ao plano de rolos como indicado na Figura 18. As tomadas de medidas ficaram limitadas pelas disposições de aberturas laterais do forno a rolos (espias) e pelo material do tubo do aparelho. Os dois pontos pretos indicados nesta Figura representam os locais de tomada de leitura pelo tubo de Pitot. Estas aquisições de dados foram realizadas para os módulos do forno a rolos compreendidos entre os números 1 e 16.

Fig. 18 – Seção transversal do forno a rolos em forma esquemática.

3.2.2 – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Para efeito de composição dos gases adotou-se a seguinte aproximação molar: gás nitrogênio (N_2) = 80% e dióxido de carbono (CO_2) = 20%, embora existam outros componentes gasosos presentes na mistura como por exemplo CO , SO_2 e H_2O que se tornam desprezíveis quando comparados com os anteriores.

As propriedades dos gases encontram-se disponíveis no Anexo B. Para valores não disponíveis na literatura adotou-se o ajuste de curvas para se determinar os demais valores.

As temperaturas dos gases foram admitidas como sendo aquelas fornecidas pela instrumentação do forno a rolos durante a realização dos experimentos e estão disponíveis na Tabela 6. Alguns módulos, como por exemplo os módulos 2 e 4, não possuem controle de temperatura, enquanto os módulos 1, 3, 5 e 6 possuem controles somente em uma de suas subdivisões.

A temperatura T_{∞} foi calculada através de uma média aritmética, com base nos valores da Tabela 6. Para valores intermediários desconhecidos, adotou-se o ajuste spline linear para determiná-los.

A densidade da placa cerâmica é função da temperatura e do tipo de material que está sendo queimado. Neste trabalho, baseado na literatura [Kingery et alli, 1976], será adotado um valor constante para a densidade aparente, haja vista que até a região de queima constata-se pouca mudança nesta propriedade. O valor médio medido pela empresa durante a realização dos testes e adotado neste trabalho foi de $2,05 \text{ g/cm}^3$. A densidade foi obtida pelo método de imersão em mercúrio.

Tabela 6 – Temperatura do fluido na corrente livre.

Módulos	Parte superior			Parte inferior			$T_{\infty} [^{\circ}\text{C}]$
	$T_1 [^{\circ}\text{C}]$	$T_2 [^{\circ}\text{C}]$	$T_3 [^{\circ}\text{C}]$	$T_1 [^{\circ}\text{C}]$	$T_2 [^{\circ}\text{C}]$	$T_3 [^{\circ}\text{C}]$	
01	213	200	200				204
03	238	220	255				238
05	440	412	403				418
06				435	402	402	413
07	618	544	537	570	489	486	541
08	664	612	611	760	600	597	641
09/10	706	691	693	810	810	809	754
11/12	753	760	757	840	835	835	797
13/14	827	813	815	860	860	860	839

15	846	885	884	900	900	904	887
16	901	938	938	940	940	940	933
17	960	990	987	1010	980	990	986
18	1028	1074	1073	1080	1060	1060	1063
19	1100	1100	1100	1100	1080	1080	1094
20	1135	1150	1150	1145	1142	1142	1144
21	1140	1147	1146	1140	1154	1154	1147
22	1145	1147	1146	1135	1154	1154	1147
23	1020	1000	1000	988	982	980	995

Para o calor específico da placa cerâmica foi adotado o valor de 0,22 cal/g°C. Este valor é utilizado pelos profissionais da área térmica das indústrias cerâmicas da região sul como sendo um valor médio e que está de acordo com a literatura.

De acordo com a corrente livre do escoamento, pode haver uma variação apreciável das propriedades dos gases entre a placa cerâmica e os gases do forno a rolos, desta forma será adotado como método de avaliação a temperatura de película ou de filme T_f , como forma amenizar este tipo problema, dada por

$$T_f = \frac{T_p + T_\infty}{2} \quad (17)$$

onde:

T_f – temperatura de película ou de filme [°C];

T_p – temperatura da placa [°C];

T_∞ – temperatura da corrente livre [°C].

3.2.3 – METODOLOGIA DE CÁLCULO

Cálculos dos Fluxos de Calor:

A Equação 16 do balanço térmico e reescrita abaixo possui quatro incógnitas que são a taxa da temperatura, o fluxo de calor por convecção, o fluxo de calor por radiação e o calor gerado pelas reações.

$$[(\dot{n}Vc)_{\text{CORPO}}] \frac{dT}{dt} = 2 \bar{h} A (T_{\infty} - T) + E_R + \dot{E}_{RE} \quad (16)$$

A solução proposta neste trabalho para esta equação é experimental e segue o seguinte roteiro:

1° - Medir dT/dt através do sistema registrador de temperatura. Desta forma a variação da taxa da energia interna é determinada;

2° - Medir o perfil de pressão manométrica ao longo do forno, para que se possa computar as velocidades dos gases a fim de se obter o coeficiente de transferência de calor por convecção e, conseqüentemente, avaliar o fluxo de calor por convecção, desta forma o primeiro termo do lado direito da equação anterior ficou determinado;

3° - Fazer a análise térmica da amostra da placa cerâmica com objetivo de se avaliar o calor gerado ao longo do processo de monoqueima em forno a rolos, determinando o terceiro membro da equação do modelo termodinâmico;

4° - Isolar na equação do modelo termodinâmico o fluxo de calor por radiação e obtê-lo como função dos parâmetros anteriormente encontrados.

Obtenção do Perfil de Velocidade:

A velocidade foi obtida através da equação de Bernoulli [Fox e MacDonald, 1992], aplicada entre dois pontos sobre uma linha de fluxo. O resultado é:

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{u_o^2}{2} + g z_o = \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} + g z \quad (18)$$

Desprezando-se diferenças de elevação e fazendo $u_0 = 0$ obtém-se como resultado o valor da velocidade de escoamento dada por:

$$u = \sqrt{\frac{2 (p_0 - p)}{\tilde{\eta}}} \quad (19)$$

Determinação do Número de Reynolds:

O número de Reynolds (Re) foi calculado utilizando a Equação 6 que representa o produto entre a densidade do fluido, velocidade média do escoamento e comprimento da placa dividido pela viscosidade cinemática do escoamento sob a placa cerâmica para cada posição ao longo do forno.

Determinação da Incerteza de Medição Experimental:

Para a estimativa da incerteza de medição é necessário distinguir dois tipos de medição, a direta e a indireta. A medição direta, é aquela cuja indicação resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre o mensurando, como por exemplo, a medida de um diâmetro com um paquímetro, ou a temperatura de uma sala por um termômetro. A medição indireta envolve a combinação de duas ou mais grandezas de entrada por meio de expressões matemáticas que viabilizam a determinação do valor associado ao mensurando, como por exemplo, a determinação da massa específica de um material calculada a partir da razão entre sua massa e seu volume já previamente medidos.

Neste trabalho foram avaliadas as incertezas de medição no perfil de temperatura e na energia interna. A temperatura é uma incerteza do tipo direta e pode ser estimada como a faixa de valores, simétrica em torno da base, que delimita a faixa de dúvidas com nível de confiança estabelecido, normalmente de 95%. Matematicamente ela é expressa por:

$$U_{95\%} = \pm \frac{t \ s}{\sqrt{n}}$$

(20)

onde,

t - coeficiente de Student;

s - desvio padrão da amostra para n medidas.

A incerteza da energia interna é do tipo indireta e o procedimento pode ser estimado através da expressão da série de Taylor. O procedimento pode ser descrito de forma genérica. Seja, por exemplo, uma grandeza G calculada em função de diversas grandezas de entrada independentes relacionadas por:

$$G = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (21)$$

Após a expansão em série de Taylor, eliminação de termos de ordens mais altas e redução de termos semelhantes chega-se a:

$$IMG_{\max} = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| IM_{x_1} + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| IM_{x_2} + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| IM_{x_3} + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| IM_{x_i} \quad (22)$$

e

$$IMG_{\text{prov}} = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} IM_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} IM_{x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} IM_{x_3} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} IM_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

onde,

IMG_{\max} - Incerteza de medição do resultado da medição;

IMG_{pro} - Incerteza de medição provável do resultado da medição;

$IM_{x_1}, IM_{x_2}, IM_{x_3}, \dots, IM_{x_i}$ - Representa as incertezas padrão associadas às grandezas de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$, respectivamente.

3.2.4 – ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 7 a seguir mostra os componentes da massa cerâmica com os respectivos teores percentuais. A técnica empregada na análise foi a de fluorescência de raios-x (FRX), com o equipamento Philips PW 2400. A análise foi realizada no CTC – Centro de Tecnologia em Cerâmica, em Criciúma – SC.

Tabela 7 – Análise química da amostra da placa cerâmica de teste.

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Perda ao fogo
Teor em Peso (%)	64,96	17,47	2,27	2,61	1,01	2,36	2,54	0,37	6,41

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados, em uma primeira etapa, os resultados do comportamento dinâmico dos gases no interior do forno, procurando-se analisar o perfil de velocidade e o tipo de escoamento. Na segunda etapa apresenta-se a curva de queima e a análise térmica objetivando-se analisar as taxas de aquecimento e o calor gerado no processo. Na terceira etapa deste capítulo apresenta-se o comportamento termodinâmico da placa cerâmica ao longo do forno, procurando-se explicar os picos da taxa da energia interna experimentados pela placa cerâmica a fim de correlacioná-los aos mecanismos físico-químicos que se desenvolvem à medida que ela avança no forno até a região de queima.

4.1 – PERFIL DE VELOCIDADE DOS GASES NO FORNO

À medida que a placa avança no forno o escoamento dos gases sobre ela apresenta um perfil de velocidade mostrado na Figura 19. Os cálculos foram efetuados a partir da Equação 19 e estão disponíveis no Anexo C. Observa-se que a partir da região de entrada do forno até a posição de 19 m que a velocidade é bem irregular, apresentando valores que oscilam entre 4,8 m/s e 8,4 m/s justificado pela alta instabilidade do escoamento, haja vista que neste local ocorre a exaustão dos gases, a qual provoca uma mudança brusca na direção da velocidade afetando desta forma sua medição. A partir da posição de 19 m o escoamento desenvolve uma velocidade na sua grande maioria com valores que oscilam entre 3,9 m/s e 5,9 m/s, apresentando uma dispersão de valores bem mais homogênea quando comparada com os valores da região anterior.

Com base nesta análise foi permitido assumir dois blocos de velocidades para o escoamento dos gases ao longo do forno até o patamar de queima, ambos com velocidades constantes, cujos valores adotados correspondem aos valores máximos de cada região, devido a possíveis flutuações da velocidade junto à superfície da placa, sobretudo na região de entrada do forno, onde o escoamento não é plenamente desenvolvido, bem como a falta de informação do perfil de velocidade a partir da posição 34 m. O primeiro bloco, se estende desde a região de entrada do forno até a posição de 19 m, cujo valor para a velocidade foi de 8,4 m/s. O segundo bloco, com velocidade de 5,9 m/s, se estende a partir da posição de 19 m até a região de queima. Estes dois blocos de velocidade foram utilizados para avaliar o tipo de escoamento.

Fig. 19 – Perfil de velocidade dos gases no forno.

4.2 – NÚMERO DE REYNOLDS

A Figura 20 mostra o número de Reynolds (Re) do escoamento sobre a placa ao longo do forno até a região de queima. A medida que a placa adentra no forno o número de Reynolds diminui de forma assintótica justificada pela variação das propriedades e da velocidade dos gases até a posição de 19 m, a partir da qual assumem valores praticamente constantes até a região de queima.

O valor máximo do número de Reynolds desenvolvido pelos gases ao longo do forno até a região de queima foi de $1,6 \times 10^5$, o qual é inferior a 5×10^5 , o que demonstra ser aparentemente um escoamento do tipo laminar, conforme discutido no item 2.3.1. Muito embora o valor do número de Reynolds para este escoamento seja inferior ao crítico, convém ressaltar que o número de Reynolds crítico é um valor representativo, uma vez que varia entre 10^5 e 3×10^6 [Incropera, 1990], dependendo da rugosidade da superfície e do nível de turbulência na corrente livre. Portanto, com base no que foi exposto, foi possível dividir o escoamento em turbulento e laminar, o primeiro se estende a partir da região de entrada do forno até a posição 19 m, enquanto o segundo se inicia a partir desta posição até a região de queima. Observa-se, também, que as propriedades do fluido exercem forte influência no perfil de Reynolds na região de entrada do forno até a posição de 7,5 m em função da velocidade apresentar-se quase que de forma uniforme ao longo desta região, enquanto que entre 7,5 m e 19 m tanto a velocidade quanto as propriedades exercem uma substancial influência, sobretudo a velocidade que apresenta valores bem oscilantes entre as posições 6 m e 15 m.

Fig. 20 – Número de Reynolds para o escoamento dos gases no forno.

4.3 – CURVA DE QUEIMA

A curva de queima é mostrada na Figura 21. Nela observam-se taxas diferenciadas de temperaturas e que o aquecimento é lento e gradual até a região de queima (entre 40 m e 50 m, aproximadamente), a partir da qual a placa sofre um resfriamento súbito até aproximadamente 650°C. E em seguida, este passa a ser lento e gradual até a saída do forno, justificada pela inversão da fase β para a fase α do quartzo, o que corresponde a uma reorientação dos ângulos das ligações químicas. Isto gera uma retração de volume na placa cerâmica de tal forma que, dependendo da taxa de resfriamento, poderá causar tensões no material cerâmico à medida que ela se resfria, propiciando o surgimento de trincas no produto final.

Fig. 21 – Perfil de queima.

A incerteza de medição da temperatura calculada no anexo D, mostrada na Figura 22, apresentou perfil crescente até a temperatura da placa no forno atingir o valor aproximado de 250°C, quando então sua incerteza máxima foi igual a 15,2°C, o que corresponde a um valor relativo de 6%. A partir de 250°C, a incerteza de medição na medida da temperatura da placa ao longo do forno até a região de queima decresce lenta

e gradualmente, atingindo um valor mínimo de $1,6^{\circ}\text{C}$ para a temperatura da placa de 1142°C , correspondendo a um valor relativo de 0,1%. Constata-se também que a partir de aproximadamente 800°C , esta passa a apresentar uma distribuição mais regular, devido à distribuição mais uniforme da temperatura sobre a placa cerâmica. Os valores apresentados para a incerteza de medição revelam que são bastante aceitáveis para a faixa de temperatura experimentada pela placa ao longo do forno até a região de queima.

Fig. 22 – Incerteza de medição da temperatura da placa no forno.

4.4 – ANÁLISE TÉRMICA

A Figura 23 mostra a curva de análise calorimétrica diferencial (DSC), bem como a curva de análise termogravimétrica (TG) de uma amostra da matéria-prima em forma de pó utilizada na fabricação da placa cerâmica de teste. Os resultados acusam a existência de cinco picos. Os picos A, B, C, D e E representam reações endotérmicas.

Através da Figura 23 e baseado em informações obtidas a partir do CRC – SITI (Centro Ricerche Ceramiche SITI)[1994] *apud* Barbosa Jr [1997] e Ghorra [1993] pode-se

notar que o pico A se estende de 30°C a 130°C e está associado à perda de água, demonstrado pelo decréscimo de massa em torno de 2% determinado pelo ensaio termogravimétrico. Os picos B e C que se estendem de 420°C a 600°C e de 600°C a

Fig. 23 – Análise calorimétrica diferencial (DSC) e termogravimétrica (TG).

720°C respectivamente, correspondem à combustão de substâncias orgânicas com eliminação de CO₂, também evidenciados por perdas de massa que para o pico B corresponde a 3,5%, enquanto que para o pico C abrange 1%, aproximadamente. O pico D que corresponde ao intervalo de 850°C a 950°C é justificado pela decomposição de carbonatos com eliminação de CO₂ com perda de massa desprezível. O pico E ocorre no intervalo de 950°C a 1050°C e representa uma ou mais transformação de fase (sem perda de massa).

A reação exotérmica é responsável pela geração de calor na placa cerâmica. Analisando-se os picos pode-se concluir que não existe calor gerado no processo. Desta forma, conforme descrito no item 2.3.3, especificamente na Equação 16, que representa o balanço térmico para a placa cerâmica, o terceiro termo do lado direito desta equação representado pelo calor gerado no processo foi desprezado uma vez que ele é nulo.

A área entre a linha base (linha reta que une o início e final de cada fenômeno físico-químico) e a curva do DSC para cada pico representa o calor absorvido pela reação por unidade de massa, o que faz com que o pico B represente o maior calor absorvido no processo. Desta forma, conclui-se que a combustão de matéria orgânica com conseqüente eliminação de CO_2 absorve grande quantidade de calor quando comparada com os demais fenômenos.

4.5 – DIFERENÇAS ENTRE AS TEMPERATURAS DO FLUIDO E DA PLACA

Na Figura 24 são apresentados os valores das temperaturas registradas pelos termopares do forno (temperatura do fluido na corrente livre) e da placa cerâmica para posições específicas ao longo do aquecimento até a região de queima. Pode-se notar que a temperatura da placa é menor que a temperatura do fluido até a região de queima. Em geral, observa-se que a diferença entre a temperatura do fluido e da placa vai diminuindo à medida que o corpo cerâmico avança no forno; entretanto, entre as posições de 25 m e 30 m observa-se que ela é tão baixa quanto na região de queima; isto pode ser devido ao intenso calor absorvido por radiação pela placa neste setor, gerado por um acúmulo de queimadores nesta região, o que faz com que a sua temperatura aumente mais do que a temperatura dos gases. A diferença entre as temperaturas da placa cerâmica e do fluido está, também, relacionada com a inércia térmica do corpo cerâmico ao ser aquecido; através da Figura 25 percebe-se que quando a taxa de aquecimento é baixa, a diferença entre as temperaturas da peça e do fluido diminui. A partir da posição 48 m, esta diferença torna-se negativa, devido à injeção de um fluxo contínuo e intenso de ar frio que abrange um módulo do forno, propiciando o início do resfriamento da placa cerâmica. Desta forma sua temperatura torna-se maior que a do fluido, indicando que ela começa a perder calor por convecção.

Fig. 24 – Perfis das temperaturas do fluido e da placa cerâmica ao longo do forno até a região de queima.

4.6 – COMPORTAMENTO TERMODINÂMICO DA PLACA CERÂMICA

Os experimentos relacionados com as taxas de variação das energias armazenadas (interna e de convecção) para uma placa cerâmica ao longo do forno cerâmico a rolos são apresentados na Figura 25.

Observa-se que o perfil da energia interna da placa cerâmica ao longo do forno até o patamar de queima (entre 40 m e 50 m aproximadamente) é bastante irregular e constituído por diversos picos.

Na etapa de queima, as principais reações e transformações de fases cristalinas e amorfas que se desencadeiam na placa cerâmica e que, possivelmente, são responsáveis pela queda da sua taxa da energia interna podem ser encontradas em CRC – SITI (Centro Ricerche Ceramiche SITI), 1994, *apud* Barbosa Jr, 1997 e Ghorra, 1993. A Tabela 8 descreve estas reações. A seguir explica-se como a taxa da energia interna da placa cerâmica varia, tendo como base estas referências e as Figuras 23 e 25.

- a -

- b -

- c -

Fig. 25 – Perfil termodinâmico da placa cerâmica a partir da entrada do forno até a região de queima: a) tempo de aquecimento; b) temperatura de aquecimento e c) posição de aquecimento.

Tabela 8 – Principais fenômenos que contribuem para a redução da energia interna da placa cerâmica durante a sua queima [Centro Ricerche Ceramiche SITI, 1994 e Ghorra,1993].

Faixa de temperatura aproximada [°C]	Fenômenos
100 – 150	Eliminação de água livre dos materiais
400 – 600 e 700 – 830	Combustão de substâncias orgânicas com eliminação de CO ₂
800 – 1050	Decomposição de carbonatos com eliminação de CO ₂
1100 – 1150	Transformação de fases

Os resultados experimentais para a taxa da energia interna da placa cerâmica demonstram oscilações em seu perfil não previstas pelo balanço térmico apresentado pela

Equação 16. Desta forma é necessário reavaliá-la, para que o balanço térmico venha de fato descrever a fenomenologia da taxa de variação da energia interna da placa ao longo do aquecimento até a região de queima. Esta análise descreve as reações químicas como possíveis fenômenos que absorvem calor e contribuem para a queda da taxa da energia interna em setores do forno, o que faz com que a Equação 16 possa ser reformulada naqueles trechos onde as reações exerçam influência. Convém salientar que a parcela referente à radiação foi desconsiderada nessa fase da análise, pois ela não é medida e sim calculada a partir do balanço térmico entre energia interna, convecção e possíveis reações.

Comparando-se as figuras 23 e 25 (b) observa-se uma relação entre a formação do pico de reação no ensaio de DSC e a queda da taxa da energia interna, ou seja, à medida que a taxa da energia interna diminui ocorre o desenvolvimento do pico de reação. Esta associação possivelmente explica as oscilações ocorridas nas taxas da energia interna. Para tal, é necessário avaliar o calor absorvido pelas reações e compará-lo com o calor absorvido por convecção para cada setor de diminuição das taxas de absorção da energia interna da placa cerâmica ao longo do processo de queima.

A Figura 26 apresenta a comparação entre os calores de convecção e de reação para os diversos eventos ocorridos durante a queima de uma placa cerâmica ao longo do forno a rolos. Cabe ressaltar que a análise desses resultados será semiquantitativa, devido aos erros experimentais serem de certa forma significativos, sobretudo para o ensaio de DSC, onde alguns eventos não são bem definidos, gerando linhas de bases não paralelas ao eixo horizontal. A energia acumulada (Figura 26) por convecção foi determinada a partir de uma integração numérica sobre o intervalo de ocorrência da queda da taxa da energia interna para cada pico, baseada na regra dos trapézios e que está descrita no apêndice E, enquanto o calor de reação acumulado foi obtido com o auxílio do ensaio de DSC. Observa-se que o calor acumulado pelas reações em cada evento ao longo do processo de queima é significativo, revelando que para o pico C o calor consumido pela reação foi cerca de 34% do calor que chega a placa cerâmica por convecção. Este resultado foi o menor quando comparado com os demais picos. Desta forma, fica comprovado que de fato as reações físico-químicas ao longo do processo de

queima de uma placa cerâmica consomem bastante energia térmica, fazendo com que a taxa da energia interna da placa venha diminuir sensivelmente.

Baseado na discussão dos efeitos dos calores de reações sobre a queda da taxa da energia interna da placa cerâmica nos diversos eventos ao longo do ciclo de queima, foi possível escrever uma equação para o balanço térmico que levasse em consideração estes efeitos para estes setores do forno e que é apresentada pela Equação 24.

$$[(\dot{n}Vc)_{\text{CORPO}}] \frac{dT}{dt} = 2\bar{h}A(T_{\infty} - T) + \dot{E}_R - \dot{E}_{\text{REAÇÕES ENDOTÉRMICAS}} \quad (24)$$

Fig. 26 – Comparação entre calores acumulados por evento durante a queima de uma placa cerâmica.

A Figura 27 apresenta o perfil da energia interna acumulada por eventos ao longo do processo de queima, determinada com base nas Equações 16 e 23, enquanto a Tabela 9 apresenta um resumo do início, máximo e do fim de cada evento para o processo de queima, baseado na Figura 25. Observa-se uma divisão do perfil em duas regiões: a

primeira região tendo início a partir da entrada do forno até o pico B; nela ocorre transferência de calor para a placa somente por convecção devido à ausência de queimadores; e a segunda região, onde ocorre transferência de calor para a placa tanto por convecção como por radiação. A separação entre as regiões ocorre em função da presença de uma cortina que limita a ação da radiação proveniente dos queimadores, e das reações que ocorrem na placa cerâmica após o pico B. Na região inicial, inclusive a Figura 25 ajuda a esclarecer o fato, o calor por convecção que chega até a placa não é igual à energia interna da placa. A justificativa é de que, além dos resultados da energia interna serem mais precisos, pois são medidos localmente sob um intervalo de tempo muito pequeno, tanto os perfis de velocidade como de temperatura do fluido são medidos na corrente livre dos gases do forno. Desta forma efeitos como borda de ataque da placa, instabilidade do escoamento e rugosidade da placa não são levados em consideração; entretanto, na segunda região estes efeitos, são bastante amenizados, pois o perfil de velocidade é mais estável.

A partir da entrada do forno até aproximadamente o valor de 4 m (100°C), a energia interna da placa se mantém constante.

Após 100°C (4 m) observa-se uma queda da taxa da energia interna do corpo cerâmico, que se estende até aproximadamente 150°C (patamar A). A diminuição da taxa da energia interna ocorre devido à evaporação da água livre do interior da massa cerâmica. Em seguida, surge o pico B, apresentando em seu topo um valor aproximado de 2960 W, para a taxa da energia interna e que termina próximo aos 600°C (19 m), correspondendo um valor para a energia interna em torno de 1750 W. A queda da taxa da energia interna na placa cerâmica é justificada pela eliminação de matéria orgânica presente em sua massa. Observa-se um desvio brusco no seu patamar de subida e a queda da taxa da energia interna neste local está possivelmente vinculada à oscilação do sistema de medição devido à forte instabilidade do escoamento neste setor.

O terceiro pico C, de menor intensidade que o anterior, se estende entre 600°C e 830°C , aproximadamente, e que corresponde às posições de 19 m e 30 m, respectivamente, apresenta em seu topo um valor da taxa da energia interna em torno de 2180 W, que corresponde a uma temperatura aproximada de 704°C . Neste pico a

redução da taxa da energia interna da placa se justifica também pela combustão de substâncias orgânicas com a eliminação de CO_2 .

O quarto pico D se estende entre 830°C (30 m) e 1050°C (42,5 m). A diminuição da energia interna neste pico está associada à decomposição de carbonatos com eliminação de CO_2 .

O último pico E que abrange o intervalo de temperaturas de 1050°C e 1150°C correspondendo às posições de 42,5 m e 48 m, respectivamente, apresenta em seu topo o valor de aproximadamente 1430 W para a taxa da energia interna da placa. A redução da taxa da energia interna da placa deve estar vinculada à transformação de fase(s).

Fig. 27 – Distribuição da energia acumulada na placa cerâmica ao longo do processo de monoqueima em forno a rolos, onde s indica a subida do pico e d indica a descida do pico.

A partir da posição 19 m (600°C), que representa o início do pico C, pode-se observar que a placa cerâmica, em geral, absorveu grandes quantidades de energia por radiação quando comparada com a energia absorvida por convecção. Nesta região da etapa de queima, à medida que a placa avança no forno, a troca de calor por radiação se intensifica, pois ela depende da quarta potência da temperatura da fonte geradora

(queimador), enquanto que a convecção depende quase exclusivamente da diferença de temperaturas entre fluido e placa, uma vez que a velocidade do fluido é uniforme e suas propriedades pouco variam. Isto conduz à conclusão que a transferência de energia por radiação para a placa cerâmica foi superior, embora no patamar de subida do pico D a transferência de energia na forma de convecção para a placa foi superior, com pouca diferença entre os dois patamares, devido a um aumento na diferença entre as temperaturas do fluido e da placa.

Tabela 9 – Grandezas físicas que definem o intervalo de ocorrência dos eventos.

Grandezas físicas	Eventos					
	Inicial	A	B	C	D	E
Tempo _{inicial} (s)	0	222	375	1188	1815	2562
Tempo _{topo} (s)	—	—	738	1344	2370	2661
Tempo _{final} (s)	222	375	1188	1815	2562	2886
Temperatura _{inicial} (°C)	40	100	150	600	830	1050
Temperatura _{topo} (°C)	—	—	334	704	991	1095,5
Temperatura _{final} (°C)	100	150	600	830	1050	1150
Posição _{inicial} (m)	0,0	4,0	6,5	19,0	30,0	42,5
Posição _{topo} (m)	—	—	12,3	22,4	39,5	44,1
Posição _{final} (m)	4,0	6,5	19,0	30,0	42,5	48,0
Taxa da energia interna _{inicial} (W)	0	1200	1030	1750	484	1020
Taxa da energia Interna _{topo} (W)	—	—	2960	2180	2490	1430
Taxa da energia Interna _{final} (W)	1200	1030	1750	484	1020	293

Outro aspecto observado, é que a energia acumulada na placa é intensa durante a formação do pico B, quando comparada com os demais eventos, justificada, sobretudo, pela necessidade do preenchimento de espaços vazios devido à eliminação de matéria

orgânica, pois o seu teor é elevado, o que demanda um maior tempo para a conclusão da etapa. Evidentemente, outros fatores, possivelmente de menor intensidade, contribuem para a incorporação de energia acumulada, entre eles destacam-se aquecimento da matéria orgânica, eliminação de outros gases, deslocamento e vibração de átomos e íons, encolhimento e/ou retração da placa e início da sinterização.

A Figura 28 apresenta o comportamento da incerteza de medição da taxa da variação da energia interna da placa cerâmica ao longo da região de aquecimento do forno a rolos. Observa-se que o seu perfil é irregular, constituído de sucessivos picos que diminuem de altura e largura à medida que a placa cerâmica se afasta da região de entrada do forno. Isto está relacionado com a variação de desvios padrões entre duas medidas sucessivas de temperaturas devido à taxa de aquecimento em que a placa é submetida. Em geral, taxas lentas e graduais geram incertezas mais homogêneas, enquanto que mudanças mais acentuadas e graduais propiciam incertezas menos homogêneas. Entretanto, a evolução da incerteza de medição à medida que a placa avança no forno mostra que há uma queda substancial e a partir aproximadamente da posição 20 m e da temperatura 650°C, a distribuição passa a ser menos dispersa .

A incerteza máxima na taxa da energia interna foi igual a 462 W para um valor base da taxa de variação da energia interna igual a 1466 W, o que corresponde a um valor relativo de 31% que ocorreu na posição 7,1 m a uma temperatura de 161°C, enquanto que a incerteza mínima foi inferior a 0,5% em diversos locais do forno. A grande maioria dos resultados, cerca de 95%, apresentaram incerteza de medição abaixo de 18%. A Tabela 10 mostra os setores do forno onde a incerteza de medição acusou valores relativos entre 18% e 31%, são intervalos de tempo, de posição e de temperatura muito curtos. De modo geral, a incerteza de medição apresentou distribuição bastante confiável para o número de medidas efetuadas.

Fig. 28 – Incerteza de medição da taxa de variação da energia interna da placa cerâmica.

Tabela 10 – Incerteza de medição da taxa de variação da energia interna para setores do forno industrial.

Intervalo de posição [m]	Intervalo de temperatura [°C]	Intervalo de tempo [s]	Valores mínimo e máximo da incerteza de medição [%]
0,00 – 0,50	37 – 44	30	20 – 30
0,55 – 6,25	45 – 144	342	< 18
6,30 – 7,45	145 – 169	69	19 – 31
7,50 – 34,00	170 – 870	795	< 18
34,05 – 34,60	870 – 878	33	18 – 29
34,65 – 48,00	878 – 1132	801	< 18

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um balanço térmico para a placa cerâmica a fim de avaliar o comportamento de sua energia interna para a região de aquecimento do processo de monoqueima em forno a rolos. Com base neste balanço foi possível fazer uma análise dos resultados obtidos na experimentação, concluindo-se para as placas avaliadas que:

- os principais fenômenos que contribuem para as quedas mais acentuadas da taxa da energia interna da placa cerâmica são a eliminação de matéria orgânica (de 2960 para 1750 W no pico B, e 2180 para 484 W no pico C) e decomposição de carbonatos (de 2490 W para 1020 W);
- a eliminação de matéria orgânica absorve bastante energia térmica (493 kJ) quando comparada com as demais reações (182 kJ);
- para a região de entrada do forno (até cerca de 19 m), a convecção contribuiu significativamente para o perfil da taxa de variação da energia interna da placa cerâmica;
- a partir da posição 19 m, a energia de radiação exerceu forte influência nas oscilações da energia interna da placa, além de, na maioria das vezes, ser superior à energia de convecção, sendo que em algumas regiões chegou a acusar valores $\geq 100\%$ do valor base;
- a região compreendida entre 8 m (cerca de 200°C) e 30m (cerca de 830°C) foi a que apresentou maior área entre a curva da taxa de variação da energia interna e o eixo

horizontal (2618 kJ) quando comparada com as demais (1465 kJ), o que aparentemente exigiu maiores consumos de energia térmica;

- tanto as propriedades dos gases como o seu perfil de velocidade até a posição de 19 m, exercem forte influência no número de Reynolds;

- baseado nos resultados experimentais, é necessário reduzir os percentuais de matéria orgânica e carbonatos presentes na massa da placa cerâmica a fim de diminuir o consumo de energia térmica. Supõe-se que, por menor que seja a redução nesses percentuais, os resultados com consumos de energia térmica serão evidentes. Esta é uma das áreas dentro do processo industrial pouco estudada e que merece um certo rigor técnico onde se pode obter um importante resultado prático;

- outro ponto que merece destaque e uma atenção especial é a troca de calor por radiação. Ela se mostra intensa, a partir de uma posição específica à medida que a placa avança no forno; desta forma, um controle mais efetivo na sua distribuição é de fundamental importância para que se possa obter um melhor resultado na eficiência térmica entre queimador e placa cerâmica, buscando-se controlar tempo e comprimento do ciclo de queima do forno a rolos, visando reduzir os custos no processo de monoqueima.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES

Para trabalhos futuros os seguintes temas deveriam ser desenvolvidos:

- submeter um material inerte, com propriedades térmicas conhecidas, a uma queima sob as mesmas condições da placa cerâmica avaliada neste trabalho, para que se possa determinar quantitativamente o calor absorvido instantaneamente pelas reações através da diferença entre os perfis das taxas de energia de ambos materiais ao longo do forno a rolos;
- propor uma solução numérica para o balanço térmico desenvolvido neste trabalho, discretizando e desacoplando o termo referente à energia de radiação para, em seguida, obter-se o perfil de temperatura no processo de monoqueima e compará-lo com os resultados experimentais, com o objetivo de se prever uma curva de queima, e se necessário, posteriormente, ajustar no forno os possíveis desvios;
- estudar as trocas térmicas de calor por radiação através da discretização e solução do termo de radiação do balanço térmico por intermédio da inversão de matrizes ou por iteração, propondo análises e melhorias referentes à geometria da seção transversal e da emissividade das paredes refratárias do forno nas regiões onde ela exerce forte influência;
- estudar as trocas térmicas de calor por convecção, através de um balanço térmico, propondo melhorias quanto ao posicionamento dos queimadores e velocidades tanto dos rolos quanto dos gases no processo de monoqueima, verificando componentes dimensional e coloração entre outras, e as propriedades mecânicas da placa cerâmica na

saída do forno. Isto poderá ser concretizado através de uma planta piloto, como por exemplo, a localizada no Centro de Tecnologia em Cerâmica, em Criciúma/SC;

- estudar o grau de influência das propriedades dos gases do forno no perfil do escoamento e na aparência da placa cerâmica, propondo para tal diferentes composições estequiométricas de oxigênio para o escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA Jr, J. C. B. **Controle da Distribuição de Tamanho de Partículas Gresificadas**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Dezembro de 1997.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. Second Edition. John Wiley & Sons. 1984.

BRISTOT, V. M. **Máquinas e Equipamentos para Cerâmica**. Criciúma – SC. Editora Luana Ltda. 1996.

Centro Ricerche Ceramiche SITI. **La Tecnologia Ceramica**. V. 1, Grafiche Lucchini, 1994.

Industrial Conventos - ICON. **Catálogo Técnico de Equipamentos Cerâmicos para Fornos a Rolos**. Brasil – Criciúma – SC. 1998.

DATAPAQ. **Catálogo Técnico do Sistema Kiln Tracker para Forno a Rolos**. Datapaq Limited. Reino Unido. 1998.

FOX, R. W.; MACDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4. ed, LTC – Livros Técnicos e Científicos S. A.

GERMAN, R. M. **Sintering Theory and Practice**. First Edition. John Wiley & Sons. 1996.

GHORRA, G. J. **Theory of Fast Firing**. Eng. Sci. Proc., v.14, n. 1-2, pp. 77-115, 1993.

HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor** (Tradução, Luiz Fernando Milanez. Revisão técnica: José Maria Saiz Jabardo). McGraw-Hill. 1983.

IBAÑES, A.; SANDOVAL, F. **La Coccion Rápida**. Boletín de la Sociedad Española, v. 35, n. 6, pp. 433-438, nov./dez, 1996.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. Fourth Edition. John Wiley & Sons, 1990.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics**. USA, John Wiley e Sons Inc. 1976.

MORENO, A.; MALLOL, G.; LLOREN, S.; ENRIQUE, J. E.; FERRER, C.; PORTOLÉS, J. **Study of Transverse Temperature Gradients in Roller Kilns Under Different Operating Conditions**. Anais do Congresso Qualicer, pp. 295-308, 1996.

MUSSOLIN, S. M. **Caracterização e Controle do Defeito Ocasionado pelo Uso do Fonolito em Massas Cerâmicas Grês**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 1996.

PADUA, L. **La Cocción de Productos Cerâmicos**. Primeira Edición. Ediciones Omega. Barcelona. 1990.

PEREIRA, C. G. **Tecnologia de Produtos Refratários**. Primeira Edição. Editora Técnica Piping LTDA. Rio de Janeiro. 1995.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais**. Segunda edição. São Paulo. 1996.

STAINER, D. **Influência dos Parâmetros de Processo na Sinterabilidade de Elementos de Moagem em Alta Alumina**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Novembro de 1997.

THÜMMLER, F.; OBERACKER R. **Introduction to Powder Metallurgy**. Published by Institute of materials. London. 1993.

ANEXOS

A. COMPONENTES DO SISTEMA REGISTRADOR DE TEMPERATURA

A) Barreira Térmica:

Além de dar sustentação mecânica, ela permite um isolamento térmico entre o ambiente do forno e o coletor de dados. Este isolamento é alcançado através de dois estágios. No primeiro estágio, uma camada de manta de fibra cerâmica reduz a temperatura a um valor próximo a temperatura de ebulição da água; no segundo estágio, uma jaqueta de aço inoxidável contendo água, envolve o coletor de dados. Enquanto a água estiver em ebulição durante o ciclo de queima, a temperatura do coletor não ultrapassará 100°C.

A barreira térmica TB 3020, apresentada na Figura 29, possui as seguintes características:

- temperatura máxima por ciclo: 1200°C;
- temperatura média por ciclo: 700°C;
- duração máxima por ciclo: 1 h;
- dimensões: (81 x 400 x 638) mm, incluindo todos os acessórios;
- peso: 14 kg com água.

Fig. 29 – Barreira térmica [Datapaq, 1998].

B) Coletor de Dados:

Funciona como um microprocessador e é carregado por duas baterias de lítio de 7,5V cada. O coletor armazena dados reais experimentados pela peça ao longo da etapa de monoqueima em forno a rolos. O sinal de temperatura enviado pelo termopar, cuja sonda está fixada na placa cerâmica, é digitalizado e armazenado para posterior análise por um software específico do sistema fabricado pela DATAPAQ.

O processo de programação do coletor envolve a definição do intervalo de coleta de temperatura, a quantidade de sondas de termopares, a duração do teste e as condições para o início da aquisição de dados (por disparo, por temperatura ou por tempo).

Especificamente, neste trabalho, foi adotada a condição de disparo, para o início da coleta de dados, nesta condição o coletor começa a armazenar dados assim que seu cabo de alimentação for desconectado (momentos antes da entrada do equipamento no forno).

Para cada teste, o coletor foi programado para armazenar dados de temperatura a cada intervalo de 3 s simultâneos para seis sondas de termopares, com tempo limite de leitura por sonda estimado em 100 min, ou seja, cada sonda poderia enviar sinal de 3 s em 3 s até atingir o limite de 100 min.

A Figura 30 ilustra o coletor de dados TPAQ 100, enquanto que a Figura 31 mostra a maneira pela qual o coletor é inserido na barreira térmica, observa-se que a barreira já está preenchida com água quando o coletor é colocado no seu interior, em seguida uma guarnição de aço inoxidável preenchida também com água é alojada na abertura, isolando por completo o coletor.

Fig. 30 – Coletor de dados [Datapaq, 1998].

O coletor dispõe de 8 canais para termopares, opera a uma máxima temperatura de 110°C, possui precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e resolução de $0,1^\circ\text{C}$. Sua memória armazena 2000 dados por canal. Suas dimensões são as seguintes: (20 x 98 x 200)mm.

Fig. 31 – Colocação do coletor na barreira térmica [Datapaq, 1998].

C) Termopar:

O termopar utilizado durante o experimento foi do tipo K. Ele possui 1,5 mm de diâmetro, precisão de $\pm 1,1^\circ\text{C}$, utilizado na faixa de 0°C a 1250°C e com revestimento específico, justamente para oferecer proteção para altas temperaturas, bem como para evitar ataque em atmosfera corrosiva.

A Figura 32 mostra o termopar utilizado no experimento. Observe que em uma de suas extremidades está instalado um conector que permite a fixação do termopar no coletor, a extremidade oposta serve para ser fixada na placa cerâmica. Sua durabilidade oscila entre 4 a 6 corridas, pois depende do tempo de queima.

D) Software:

Desenvolvido pela DATAPAQ com o nome de Kiln Tracker For Windows - Roller Hearth Kiln.

Além de fazer uma análise do perfil de queima, ele permite programar o coletor, através de um cabo específico que acompanha o kit. Este cabo é instalado na porta serial de saída do micro, ele une o microcomputador com o coletor, permitindo o envio de dados e informações.

Fig. 32 – Termopar tipo K para operação em forno a rolos [Datapaq, 1998].

Os dados coletados na etapa de queima são analisados, visualizados e podem ser exportados/importados de um arquivo do tipo Excel. Os dados podem ser tanto impressos na forma de tabela como na forma de gráficos.

A Figura 33 representa uma tela de saída de dados (o software usado) para analisar os resultados dos testes. O menu de ferramentas dispõe de 22 opções de janelas, o que permite uma boa análise do ciclo de queima em forno a rolos.

Fig. 33 – Programa computacional de análise do perfil de queima [Datapaq, 1998].

B. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

A Tabela 11 mostra as propriedades termofísicas empregadas para a obtenção do perfil de energia interna da placa cerâmica ao longo do forno a rolos até a região de queima. Observa-se que a faixa de temperatura disponível na literatura não abrange toda a faixa de temperatura do experimento (aproximadamente entre 35°C a 1150°C). Desta forma adotou-se o ajuste de curvas para determinar os demais valores. No rodapé da tabela estão indicados os tipos de curvas utilizadas nos ajustes para os valores das propriedades não encontradas na literatura. Para o caso do número de Prandtl “Pr” adotou-se um valor médio de 0,7095 para toda faixa de temperatura de interesse.

Tabela 11 – Propriedades termofísicas dos gases do forno à pressão atmosférica [Incropera, 1992].

T [°C]	ρ [kg/m ³]	$\mu \times 10^7$ [Ns/m ²]	$k \times 10^3$ [W/m°C]	Pr
27 a 77	1,15738	183,41	25,855	0,7210
77 a 127	1,00961	203,60	29,35	0,7139
127 a 177	0,88679	228,10	32,66	0,7093
177 a 227	0,79272	243,02	35,96	0,7065
227 a 277	0,71671	261,16	39,15	0,7054
277 a 327	0,65411	278,30	42,25	0,7050
327 a 377	0,58681	300,52	46,32	0,7057
377 a 427	0,57419	304,02	47,06	0,7057
427 a 477	0,50713	330,64	51,86	0,7115
477 a 527	0,49763	333,84	52,56	0,7114

Ajustes: - densidade (ρ): polinômio de quarto grau
- viscosidade cinemática (μ): polinômio de quarto grau
- condutividade térmica (k): polinômio de primeiro grau

C. PERFIL DE VELOCIDADE

A Tabela 12 mostra a velocidade obtida experimentalmente através de medições do diferencial de pressão para cada posição pré-estabelecida a partir da entrada do forno.

Tabela 12 – Perfil de velocidade.

		Rampa inferior do forno			
Módulo	Posição [m] *	ΔP_1 [Pa]	ΔP_2 [Pa]	$\Delta P_{\text{médio}}$ [Pa]	u [m/s]
01	0,97	13,8	13,8	13,8	5,3
02	3,25	10,8	9,8	10,3	4,8
03	5,49	9,8	11,8	10,8	5,2
04	7,75	12,8	12,8	12,8	5,8
05	10,55	22,6	18,7	20,6	8,4

06	12,70	8,8	7,9	8,4	5,4
07	14,85	5,9	5,9	5,9	4,9
08	17,00	5,9	5,9	5,9	5,1
09	19,15	7,9	7,9	7,9	5,9
10	21,30	5,9	5,9	5,9	5,2
11	23,45	5,9	5,9	5,9	5,2
12	25,60	5,9	5,9	5,9	5,2
13	27,75	3,9	3,9	3,9	4,2
14	29,90	3,9	3,9	3,9	4,2
15	32,05	3,9	3,9	3,9	4,2
16	34,20	3,9	3,0	3,4	4,0

* a partir da entrada do forno.

D. INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

D-1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

É dada por

$$U_{95\%} = \pm \frac{t \, s}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

onde,

t=2,11 (fator de student)

n=18 (número de medidas)

A Figura 34 apresenta o perfil da temperatura com as respectivas incertezas ao longo do forno.

Fig. 34 – Incertezas máxima e mínima de medição da temperatura da placa no forno.

D-2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ENERGIA INTERNA

É dada por

$$\frac{dE_{INT}}{dt} = \tilde{n}Vc \frac{dT}{dt} \quad (25)$$

$$\frac{dE_{INT}}{dt} = \tilde{n}Vc \frac{\ddot{A}T}{\ddot{A}t} \quad (26)$$

considerando que t é fixo (3segundos) e ρ , c e V são constantes, obtém-se:

$$IM_{E_{INT}} = \sqrt{\left(\frac{\tilde{n}Vc}{\ddot{A}t} IM_{\ddot{A}T}\right)^2} \quad (27)$$

$$IM_{E_{INT}} = \left(\frac{\tilde{n}Vc}{\ddot{A}t} \right) IM_{\ddot{A}T} \quad (28)$$

Onde, $IM_{\Delta T}$, é calculada como a diferença entre os desvios padrões entre duas medidas sucessivas da temperatura da placa.

A Figura 35 apresenta o perfil da taxa de variação da energia interna com as respectivas incertezas.

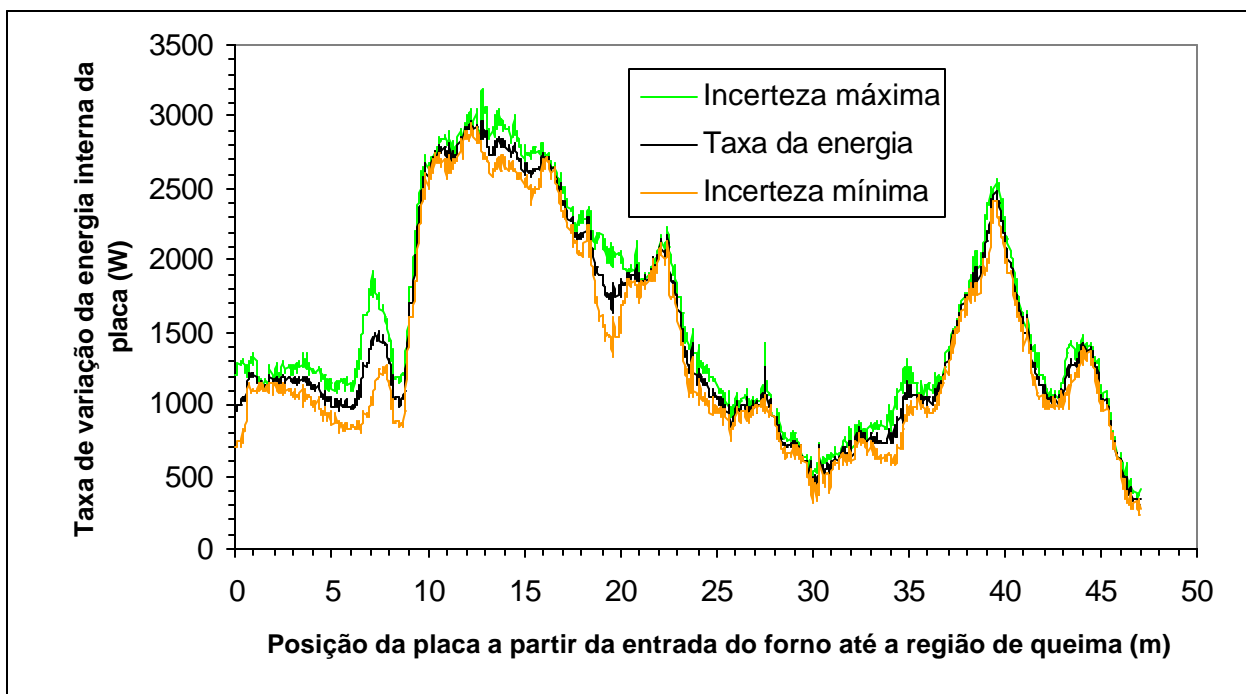


Fig. 35 – Incertezas máxima e mínima de medição da taxa de variação da energia interna da placa cerâmica.

E. REGRA DOS TRAPÉZIOS

A idéia básica da integração numérica [Ruddgiro et alli, 1996] é aproximar razoavelmente a função $f(x)$ por um polinômio interpolador no intervalo $[a,b]$. Neste método o polinômio utilizado é do primeiro grau, $P_1(x)$.

Aplicando $P_1(x)$ como uma função aproximadora para $f(x)$ entre x_0 e x_1 obtém-se

$$\int_a^b f(x) dx = \int_{a=x_0}^{b=x_1} P_1(x) dx = \frac{H}{2} [f(x_0) + f(x_1)] \quad (29)$$

onde, o resultado da integração representa a área do trapézio de altura $H=x_1-x_0$ e bases $f(x_0)$ e $f(x_1)$, a Figura 36 ajuda a esclarecer tal fato.

Fig. 36 – Interpretação gráfica para a regra dos trapézios [Ruggiero et alli, 1996].

Evidentemente, as áreas delimitadas entre as curvas e os eixos cartesianos são diferentes, o que gera um erro, da interpolação polinomial ele é dado por,

$$E_1(x) = (x - x_0)(x - x_1) \frac{f''(\xi_{(x)})}{2}, \quad \xi_{(x)} \in (x_0, x_1) \quad (30)$$

Introduzindo o erro $E_1(x)$ na Equação 25 obtém-se a Equação 27.

$$\int_{x_0}^{x_1} f(x) dx = \frac{H}{2} [f(x_0) + f(x_1)] + \int_{x_0}^{x_1} (x - x_0)(x - x_1) \frac{f''(\xi_{(x)})}{2} dx \quad (31)$$

Para minimizar o erro $E_1(x)$, subdivide-se o intervalo $[a,b]$ em m subintervalos de altura h , resultando a fórmula da regra dos trapézios repetidas vezes, dada por,

$$\int_{a=x_0}^{a=x_m} f(x) dx = \frac{h}{2} \{f(x_0) + 2[f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{m-1})] + f(x_m)\} - \frac{mh^3 f''(\xi)}{12} \quad (32)$$

onde,

$$-\frac{mh^3 f''(\xi)}{12} \text{ é o erro cometido, com } \xi \in \text{ ao intervalo } [a,b].$$